



ZAŘÍZENÍ NA VÝROBU JÁDROVÉ PŘÍZE

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T010 – Konstrukce strojů a zařízení
Autor práce: **Bc. Ondřej Batka**
Vedoucí práce: prof. Ing. Jaroslav Beran, CSc.





DEVICE FOR PRODUCTION OF CORE YARN

Diploma thesis

Study programme: N2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2302T010 – Machines and Equipment Systems
Author: **Bc. Ondřej Batka**
Supervisor: prof. Ing. Jaroslav Beran, CSc.



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej Bařka**
Osobní číslo: **S13000457**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce strojů a zařízení**
Název tématu: **Zařízení na výrobu jádrové příze**
Zadávající katedra: **Katedra textilních a jednoúčelových strojů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

- 1) Rešerše systémů navíjení příze a rešerše používaných elektrod zvláknování polymerů účinným elektrického proudu.
- 2) Návrh vhodného systému pro navíjení jádrové příze.
- 3) Analýza rozložení intenzity elektrického pole u stávající přeplavovací elektrody.
- 4) Optimalizace tvaru přeplavovací elektrody z pohledu optimální intenzity elektrického pole.
- 5) Konstrukce systému navíjení a tvorba výkresové dokumentace.
- 6) Případné ověření navíjecího systému příze.


Rozsah grafických prací: **výkresová dokumentace**
Rozsah pracovní zprávy: **45 stran, formát A4**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

- [1] LUKÁŠ, D. a kol.: Physical principles of electrospinning (Electrospinning as a nanoscale technology of twenty-first century), Textile Progress, 41 (2009), 59-140, ISSN 0040-5167.
[2] HŮBNER; K.: Analýza a optimalizace zařízení na výrobu nanovláken. Bakalářská práce TUL, 2012.
[3] MIHÁLIK, M.: Analýza a optimalizace zvlákňovací hlavy. Bakalářská práce, 2013.
[4] Kolektiv autorů: Textilní stroje I. Librec: Skripta TUL, 1991.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Jaroslav Beran, CSc.**
Katedra textilních a jednoúčelových strojů
Konzultant diplomové práce: **Ing. Jan Valtera, Ph.D.**
Katedra textilních a jednoúčelových strojů
Datum zadání diplomové práce: **2. února 2015**
Termín odevzdání diplomové práce: **2. února 2016**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




prof. Ing. Jaroslav Beran, CSc.
vedoucí katedry

V Liberci dne 2. února 2015

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Poděkování

Děkuji tímto vedoucímu diplomové práce prof. ing. Jaroslavu Beranovi, CSc. za odborné vedení a užitečné rady. Děkuji také svému konzultantovi Ing. Janu Valterovi, Ph.D. za asistenci při zdlouhavých měřeních prováděných na stroji. Děkuji katedře textilních a jed nouúčelových strojů za poskytnutí výkonné počítačové laboratoře a také Fakultě strojní Technické univerzity v Liberci a jejím katedrám za poskytnutí cenných odborných informací po celou dobu mého studia. Poděkování patří také pracovnícím studijního oddělení FS za poskytování informací a trpělivý dohled nad plněním mého studijního plánu.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá konstrukcí vybraných částí stroje, který slouží pro laboratorní výrobu jádrové příze opatřené vrstvou nanovláken.

První část práce je zaměřena na konstrukci vhodného systému pro navíjení vyrobené příze do podoby křížového návínu. Byla navržena konstrukce s rozváděním pomocí řemínkového mechanismu. Důležitým parametrem pro návrh bylo snížení pasivních odporů mezi navíjecími prvky a navíjenou přízí. Bylo navrženo více řešení eliminace vlivu pasivních odporů. Zvolený návrh navíjecího zařízení byl konstrukčně zpracován včetně výrobní dokumentace a vyrobený funkční model byl testován při zvlákňovacím procesu.

Druhá část práce se zabývá analýzou stávající zvlákňovací elektrody, která je důležitou částí ústrojí na výrobu nanovláken. Pomocí programu Autodesk Simulation Mechanical byly analyzovány vlivy různých konstrukčních rozměrů elektrody na rozložení intenzity elektrického pole. Byl navržen nový tvar zvlákňovací elektrody, jejíž geometrie byla optimalizována z hlediska optimálního rozložení intenzity elektrického pole. V závěru bylo provedeno měření produktivity na původní a optimalizované elektrodě při procesu zvlákňování. Porovnání výsledků měření prokázalo zvýšení produktivity optimalizované zvlákňovací elektrody.

Klíčová slova:

Jádrová příze, rozvádění příze, řemínkový mechanismus, elektroda, intenzita elektrického pole

Abstract

The diploma thesis is focused on the design of two selected system of a device used for laboratory scale production of core yarn with nanofibrous shell.

The first part of the thesis deals with the design of a winding system with cross-wound bobbin suitable for the yarn with nanofibrous shell. For this purpose, the winding system with belt mechanism was designed. The design reflects the requirements on minimal passive resistance. Several concepts of passive resistance reduction was considered and evaluated. The final concept of the winding system was designed, including the drawing documentation and the manufactured model was tested in the electrospinning process.

The second part of the thesis deals with the electrostatic analysis of an electrode that is used for spinning of nanofibers. The influence of the electrode geometrical parameters on the electric field strength distribution was analysed in the software Autodesk Simulation Mechanical. Based on that, the new shape of the electrode was designed. In order to obtain the optimal electrical field strength distribution, the electrode dimensions were optimised. The experimental verification of both the original and the optimised type of electrode was carried out. The results proved the productivity increase of the optimised electrospinning electrode in comparison to the original one.

Klíčová slova:

Core yarn, yarn traversing, belt mechanism, electrode, electric field

OBSAH

Seznam zkratk a symbolů	8
1 Úvod.....	9
2 Teorie tvorby návinu příze.....	10
2.1 Druhy vinutí.....	10
2.1.1 Paralelní vinutí.....	11
2.1.2 Divoké křížové vinutí	11
2.1.3 Přesné křížové vinutí	12
2.1.4 Digitální vinutí.....	12
2.1.5 Dokonale přesné křížové vinutí	12
2.2 Systémy rozvádění příze	13
2.2.1 Řemínkový mechanismus	13
2.2.2 Mechanismus s kyvnou vidličkou.....	13
2.2.3 Mechanismus s rozváděcím válečkem.....	14
2.2.4 Mechanismus s rozváděcím bubnem	15
2.2.5 Rozvádění pomocí rotujících talířů.....	15
2.2.6 Rozvádění pomocí rotujících křídel.....	16
2.2.7 Další systémy rozvádění	16
3 Teorie výroby nanovláken	17
3.1 Způsoby výroby nanovláken.....	17
3.1.1 Drawing	17
3.1.2 Forcespinning.....	18
3.1.3 Melt-blowing	19
3.1.4 Elektrospinning.....	19
3.1.5 Zvlákňování účinkem střídavého proudu	20
3.2 Používané typy elektrod.....	21
3.2.1 Zvlákňovací tryska.....	21
3.2.2 Vícetrysková elektroda	22
3.2.3 Elektroda pro zvlákňování z volné hladiny	22
3.2.3 Strunová elektroda	23
3.2.4 Vícestupňová elektroda.....	23
4 Návrh vhodného systému navíjení.....	24
4.1 Současný stav	24

4.2 Konstrukce nového navíjecího systému	25
4.2.1 Navíjecí uzel	27
4.2.2 Rozváděcí uzel	29
4.2.3 Volba rozváděcího elementu	31
4.3 Výpočty provedené u navíjecího ústrojí	34
4.3.1 Výpočet maximálního zdvihu rozváděcího elementu.....	34
4.3.2 Výpočet rychlostních poměrů	36
4.3.3 Maximální zrychlení krokového motoru	37
4.3.4 Zdvihová závislost rozváděcího pohybu.....	39
5 Ověření navíjecího systému	41
6 Analýza a optimalizace zvlákňovací elektrody	42
6.1 Analýza stávající elektrody	42
6.1.1 Výpočtový model.....	43
6.1.2 Analýzy rozložení intenzity elektrického pole	45
6.2 Návrh a optimalizace nového tvaru elektrody	49
6.3 Měření na elektrodách při zvlákňovacím procesu	54
6.3.1 Kritická napětí.....	54
6.3.2 Měření produktivity elektrod	55
7 Závěr	60
Použité zdroje	61
Seznam příloh	62

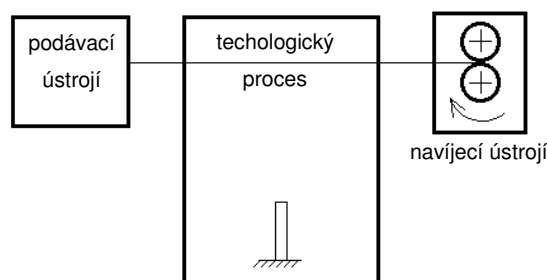
Seznam zkratk a symbolů

symbol	jednotka	popis
R_s	l	soukací poměr
d	m	průměr návinu
h	m	úfka návinu
α	°	úhel křížení
β	°	úhel stoupání návinu
s_0	m	stoupání ovinů
x	m	přesah rozváděcího bodu
a	m	průmět délky příze
v_n	$m \cdot s^{-1}$	navíjecí rychlost
v_r	$m \cdot s^{-1}$	ustálená rozváděcí rychlost
n_n	min^{-1}	otáčky motoru navíjecího uzlu
n_r	min^{-1}	otáčky motoru rozváděcího uzlu
r_d	m	poloměr dutinky
$r_{řem}$	m	poloměr řemenice
J_{RED}	$kg \cdot m^2$	moment setrvačnosti redukováný na hřídel
J_{rot}	$kg \cdot m^2$	moment setrvačnosti rotoru motoru
J_{sv}	$kg \cdot m^2$	moment setrvačnosti svěrného pouzdra
$J_{řem}$	$kg \cdot m^2$	moment setrvačnosti řemenic
$J_{hř}$	$kg \cdot m^2$	moment setrvačnosti hřídele
m	kg	hmotnost vozíku
ϵ_{max}	s^{-2}	maximální úhlové zrychlení motoru
a_{vmax}	$m \cdot s^{-2}$	maximální zrychlení vozíku
M_{2N}	$N \cdot m$	jmenovitý moment motoru
M_{req}	$N \cdot m$	celkový moment zátěže
M_a	$N \cdot m$	mez průtažnosti
M_L	$N \cdot m$	moment statické zátěže
k	l	bezpečnost
J	$kg \cdot m^2$	moment setrvačnosti zátěže
L	m	šířka rozvádění
a_v	$m \cdot s^{-2}$	zrychlení vozíku
t_1	s	čas rozběhu
t_2	s	čas ustálené pohybu při ustálené rychlosti
t_3	s	čas doběhu

1 Úvod

V současné době je v mnoha vědních i společenských oborech stále více využíváno nanovláknenných materiálů, proto vývoj těchto struktur a strojů na jejich výrobu zaznamenal velký rozmach. Nanovláknna jsou využívána zejména v medicínských aplikacích, k filtrování tekutin, dále v oděvnictví, elektrotechnice a také ve stavebnictví či strojírenství, například jako plniva kompozitních materiálů. Jejich přednost spočívá především v malých rozměrech samotného vlákna a jeho vysokého měrného povrchu.

Předložená práce se zabývá návrhem konstrukce vybraných uzlů stroje na výrobu jádrové nanovláknenné příze. Vývoj stroje a samotné technologie výroby jádrové nanopříze je nyní v prvopočátku a tudíž se jedná o koncepci funkčního modelu takového stroje. Na obrázku 1.1 je zobrazeno zjednodušené schéma stroje. Jako většina textilních strojů se skládá ze tří základních částí a to podávacího ústrojí, vlastní výrobní technologie a ústrojí navíjecího. V práci budou řešeny jen některé konkrétní části stroje.



obr. 1.1 Schéma stroje

První část práce se zabývá návrhem vhodného navíjecího mechanismu, pro tvorbu náviny na cívku, která by zajišťovala skladovatelnost a použitelnost příze pro další následné aplikace.

Druhá část je věnována analýze stávající zvlákňovací elektrody a návrhu optimalizované elektrody z hlediska rozložení intenzity elektrického pole. Zvlákňovací elektroda je nejdůležitější částí technologie na výrobu nanovláken a její tvar, potažmo rozložení intenzity elektrického pole, má zásadní vliv na výrobnost vláken a jejich výslednou strukturu. Proto je analýze elektrody věnována náležitá pozornost. Pro analýzu rozložení intenzity elektrického pole bude využito softwarového nástroje Autodesk Simulation Mechanical.

2 Teorie tvorby návinu příze

Příze je délkový textilní útvar, který slouží pro výrobu tkanin, pletenin, spojování textilií a pro další textilní technologie. Uchovává se ve formě návinu na cívkách, které mají různé velikosti, tvary. Cívky mohou být navinuty na dutinkách s čely či bez čel, nebo mohou být samonosné.

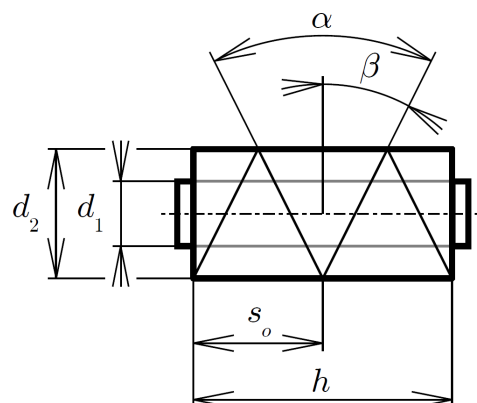
Proces navíjení cívky se skládá ze dvou navzájem propojených pohybů a to rotace cívky kolem vlastní osy a rozváděcího vratného pohybu příze. Existuje několik druhů návinu a navíjecích mechanismů, které budou popsány v následujících kapitolách.

2.1 Druhy vinutí

Rozlišujeme dva základní typy vinutí, a to paralelní a křížové. U křížového sledujeme několik parametrů. Je to zejména soukací poměr, který je definován jako počet otočení cívky na jeden dvojzdvih rozváděcího pohybu, jenž lze vypočítat pomocí vzorce 2.1. Jednotlivé parametry výpočtu popisuje obrázek 2.1. Dále je sledován také úhel křížení a vzdálenost mezi sousedními ovinů.

$$R_s = \frac{2 \cdot h}{\pi \cdot d \cdot \tan(\beta)} \quad (2.1) [1]$$

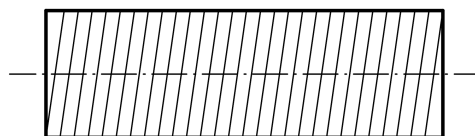
R_s	[1]	soukací poměr
d	[m]	průměr návinu
h	[m]	šířka návinu
α	[°]	úhel křížení
β	[°]	úhel stoupání návinu
s_o	[m]	stoupání ovinů



obr. 2.1 Základní parametry návinu [2]

2.1.1 Paralelní vinutí

Jednotlivé oviny jsou kladeny paralelně a vzniklý návin vytváří šroubovici; znázorněno na obr 2.2. Stoupání návinu je velmi malé a oviny nejsou mezi sebou provázány. Paralelní vinutí vzniká, pokud je rychlost otáčení cívky výrazně vyšší než rychlost rozvádění. Aby byl takto provedený návin stabilní je nutné opatřit cívku čely. [2]



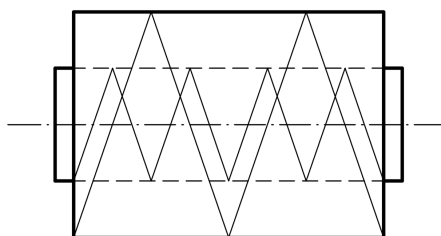
obr. 2.2 Paralelní návin [2]

2.1.2 Divoké křížové vinutí

U všech druhů křížového vinutí dochází ke křížení navíjené příze, jednotlivé oviny jsou kladeny pod určitým úhlem a vzniká tak provázání návinu.

Divoké vinutí vzniká, pokud je cívka naháněna obvodově a rychlost rozvádění je přímo úměrná obvodové rychlosti cívky. Stoupání návinu se v průběhu navíjení zvyšuje, soukací poměr klesá a úhel křížení zůstává konstantní, obr. 2.3.

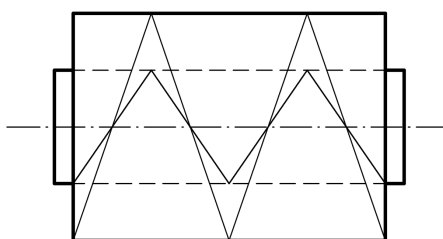
U tohoto typu návinu se projevuje takzvané pásmové vinutí, které vzniká, pokud je soukací poměr roven celému číslu. Tento efekt má za následek kladení jednotlivých ovinů přímo na sebe, což má nežádoucí účinky například při barvení nebo odvíjení příze. Je nutno tedy pásmové vinutí rušit nuceným narušením vazby mezi otáčkami a rychlostí rozvádění, zpravidla prokluzem cívky. Z tohoto vyplývá, že divoké vinutí nelze použít u technologií, kde je nutné udržet konstantní odtahovou rychlost příze. [2]



obr. 2.3 Divoké vinutí [2]

2.1.3 Přesné křížové vinutí

U přesného křížového vinutí je cívka naháněna osově a rychlost rozvádění je přímo úměrná úhlové rychlosti cívky. Náhon cívky a rozváděcí pohyb musí být tedy jednoznačně svázány, což zpravidla vede ke složitějším mechanismům rozvádění, případně je možné svázat pohyby elektronicky. Stoupání ovinů i soukací poměr je v průběhu navíjení konstantní a úhel křížení klesá. obr. 2.4 . Pomocí tohoto typu návínů lze klást oviny velmi blízko u sebe a dosáhnout tak většího zaplnění cívky než u vinutí divokého. [2]



obr. 2.4 Přesné křížové vinutí [2]

2.1.4 Digitální vinutí

Digitální vinutí kombinuje princip divokého a přesného křížového vinutí. Dochází při něm ke krokovým změnám soukacího poměru, který je po částech konstantní a úhel křížení se mění v úzkém rozsahu. Převod mezi rotací cívky a rozváděcím pohybem je řešen elektronicky. [3]

2.1.5 Dokonale přesné křížové vinutí

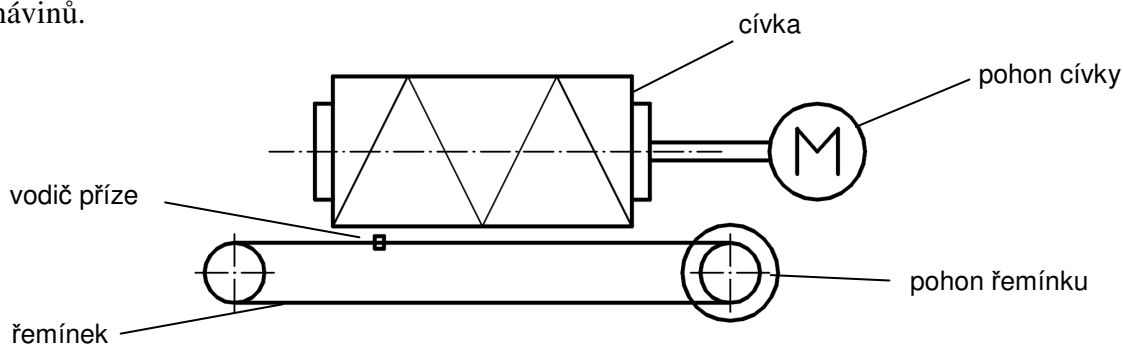
Dokonale přesné křížové vinutí (DPKV) vyvinuté na Katedře textilních a jednoúčelových strojů Technické univerzity v Liberci, vychází z přesného křížového vinutí. Využívá osového náhonu cívky a rozváděcí pohyb je spřažen s rotací cívky přesně určeným převodem, který se během navíjení mění. Systémem DPKV je možné navíjet jednotlivé oviny s nulovou mezerou a dosáhnout tak maximálního zaplnění cívky. [3]

2.2 Systémy rozvádění příze

Systémy navíjení příze lze rozdělit do více kategorií. Jednou z nich je dělení na individuální a skupinové, podle toho, zda jsou cívky na stroji navíjeny jednotlivě či současně. Tato práce se bude vzhledem k charakteristice navrhovaného stroje zabývat především individuálními mechanismy. Dále dělíme rozvádění dle typu rozváděcího elementu na hmotné a nehmotné. U hmotného je příze rozváděna pomocí rozváděcího vodiče, u nehmotného zpravidla pomocí drážky. Nehmotný systém se vyznačuje tím, že zde není přítomen žádný pohybující se hmotný vodič, dynamické účinky jsou minimální a lze tedy dosahovat vyšších rychlostí rozvádění než u hmotného systému. Systémy jsou také odlišné z hlediska konstrukce a principu dosažení vratného pohybu příze.

2.2.1 Řemíkový mechanismus

Systém, znázorněný na obr. 2.5, využívá řemenový převod. Krokovým motorem je poháněna hnací řemenice, která pohybuje s řemínkem. Na řemínku je připevněn rozváděcí element. Krokový motor koná kývavý pohyb a pomocí řemenového převodu dochází k rozváděcímu pohybu. Jedná se o hmotný individuální systém rozvádění. Jeho výhodou je plně elektronické řízení, což nabízí možnost navíjení velkého rozsahu typu návínů.



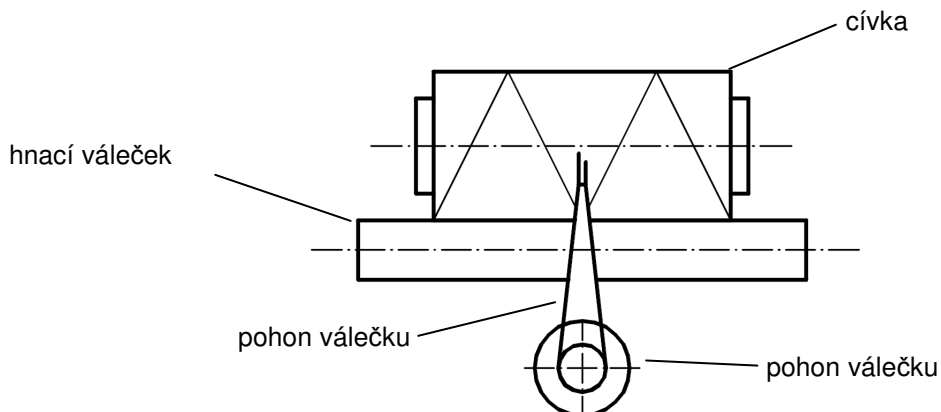
obr. 2.5 Řemíkový mechanismus [2]

2.2.2 Mechanismus s kyvnou vidličkou

Další způsob individuálního rozvádění, zobrazený na obrázku 2.6, je mechanismus s kyvnou vidličkou, který vyvinula firma oerlikon. Rozváděcí pohyb je stejně jako u řemíkového mechanismu realizován prostřednictvím elektronicky říditelného krokového motoru. Rozdíl je v tom, že řemínek je zde nahrazen vidličkou, která je přímo na-

2. Teorie tvorby návínů

sazena na hřídel motorku, konající kývavý pohyb. Cívka je u tohoto principu naháněna obvodově hnacím válečkem. [2]

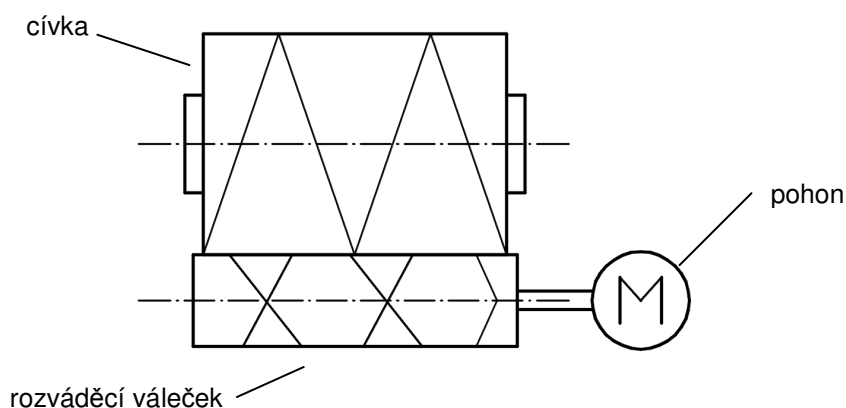


obr. 2.6 Mechanismus s kynou vidličkou [2]

2.2.3 Mechanismus s rozváděcím válečkem

Princip zobrazený na obrázku 2.7 využívá pro rozvádění váleček, který je opatřen drážkou o speciálně navrženém tvaru. Při drážkou při navíjení prochází a prostřednictvím tvaru drážky a rotací válečku dochází k rozváděcímu pohybu. K rozvádění dochází bez přítomnosti hmotného rozváděcího elementu, tudíž se jedná o nehmotný rozváděcí systém, v důsledku čehož lze dosahovat vyšších rychlostí rozvádění.

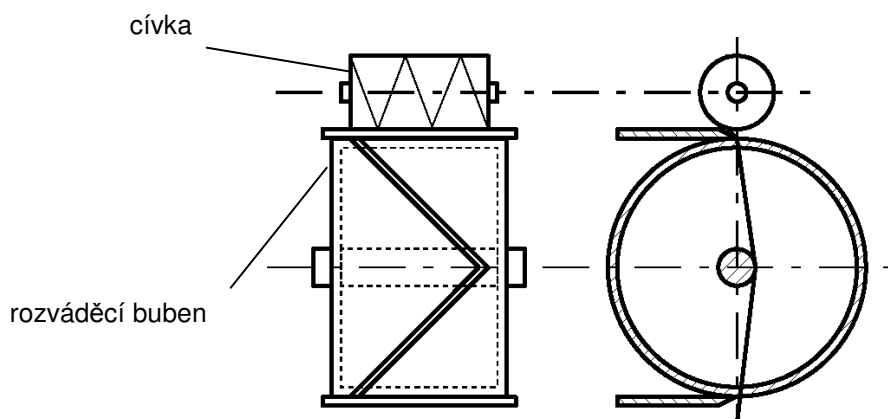
Váleček slouží zároveň jako hnací pro samotnou cívku. Cívka je tedy naháněna obvodově a jedná se tak o typický příklad mechanismu pro divoké vinutí. Používá se především u přesoukávacích strojů. Tento systém nelze využít u technologie, která vyžaduje konstantní odtahovou rychlost. Nevýhodou tohoto systému také je, že nelze jednoduše měnit úhel křížení a soukací poměr. Lze toho docílit pouze záměnou rozváděcího válečku



obr. 2.7 Mechanismus s rozváděcím válečkem

2.2.4 Mechanismus s rozváděcím bubnem

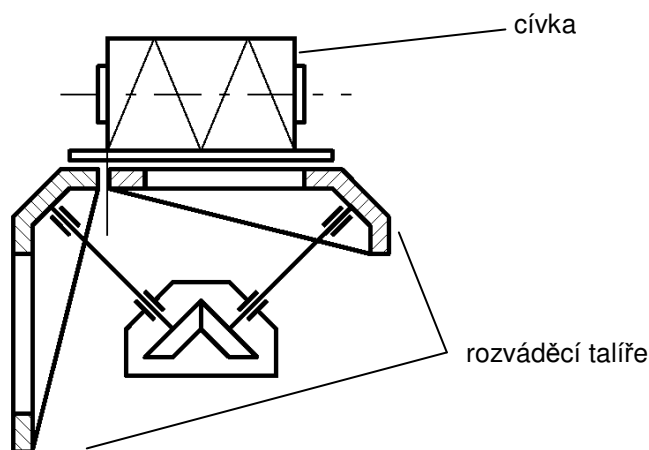
Mechanismus s rozváděcím bubnem na obrázku 2.8 využívá podobně jako u předchozího principu rozvádění pomocí drážky, jedná se tedy taktéž o nehmotný systém rozvádění. Rozdíl spočívá v tom, že příze prochází středem bubnu, a zejména v tom, že cívka i rozváděcí buben jsou naháněny nezávisle na sobě pomocí řízených pohonů. Je tak možné navíjet přesný křížový návin. Tento systém je v současné době hojně využíván a je velmi efektivní.



obr. 2.8 Mechanismus s rozváděcím bubnem [2]

2.2.5 Rozvádění pomocí rotujících talířů

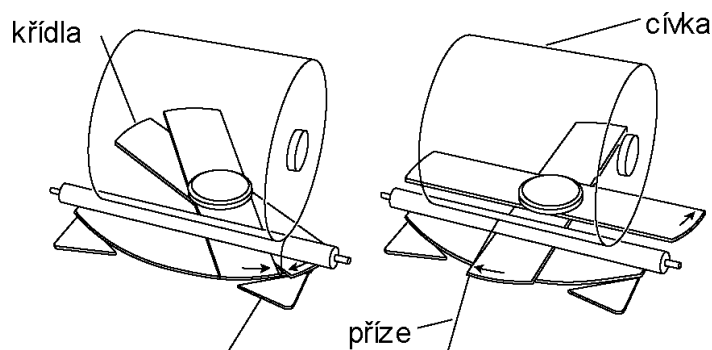
Princip znázorněný na obrázku 2.9 je zajímavou alternativou k rozvádění bubnem. Byl vyvinut firmou Hacoba především z důvodů patentové ochrany na systém s rozváděcím bubnem. Smysl byl takový, aby byl vytvořen taktéž přesný křížový návin, což bylo dosaženo speciálním tvarem a umístěním rotujících talířů. Tento princip má však mnoho nedostatků, především náročnou výrobu, či špatnou možnost vyvážení. Proto se již tento mechanismus nevyužívá. [2]



obr. 2.9 Rozvádění pomocí rotujících talířů

2.2.6 Rozvádění pomocí rotujících křídel

Další princip rozvádění příze je zobrazen na obrázku 2.10. Jedná se o systém se dvěma nesouose uloženými křídly, která rotují a v úvratích si přízi předávají. Jelikož zde není žádný element konající rozváděcí pohyb, jedná se o nehmotný systém. Používá se taktéž pro individuální rozvádění. Pohon cívky je nezávislý na rotaci křídel, lze tedy regulovat soukací poměr a úhel křížení. [2]



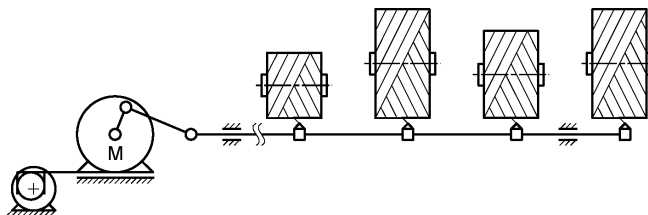
obr. 2.10 Mechanismus s rotujícími křídly [2]

2.2.7 Další systémy rozvádění

Jedním z dalších způsobů rozvádění je systém zobrazený na obrázku 2.11. Byl vyvinut na katedře Textilních a jednoúčelových strojů Technické univerzity v Liberci. Využívá pro rozvádění klikový mechanismus a jeho zdvihová závislost je prostřednictvím řízeného pohonu upravena tak, aby rozváděcí rychlost mezi úvratěmi byla konstantní.

Vůbec nejstarším typem mechanismů pro rozvádění jsou mechanismy vačkové a to buď s vačkou radiální nebo axiální. Tyto mechanismy jsou postupem času stále více nahrazovány, neboť vačky již nedovolují zvyšování rychlostí rozvádění, což jiné mechanismy nabízejí.

Klikové i vačkové mechanismy slouží především ke skupinovému rozvádění, kdy je tímto poháněna rozváděcí tyč dlouhá až několik desítek metrů.



obr. 2.11 Klikový rozváděcí mechanismus [2]

3 Teorie výroby nanovláken

V současné době jsou nanomateriály označovány jako materiály třetího tisíciletí. První myšlenky o nanovlákních však sahají do poměrně dávné historie. Již v 17. století zkoumal William Gilbert fyzikální jevy spojené s elektrospinningem, když pozoroval tvorbu kuželovitého tvaru na kapkách vody při přiblížení kousků třeného jantaru. [4]

Mezi lety 1934 až 1944 byla podána série patentů, které popisovaly produkování vláken za pomoci elektrostatických sil. [4]

V roce 1959 položil Richard Feynman ve své slavné přednášce *"There is a plenty of room at the bottom."* otázku, „Proč bychom nemohli zapsat na špendlíkovou hlavičku všech 24 dílů *Encyklopedie Britanniky*?“ [5] Předpověděl, že v budoucnu toto bude možné, předpovídal nanotechnologiím velkou budoucnost a vyzval vědecký svět, aby začal dobývat nanosvět.

V roce 1971 bylo vyvinuto zařízení na výrobu akrylových vláken o průměru menším než jeden mikrometr. [4]

Od devadesátých let dvacátého století zaznamenal vývoj nanovlákněných struktur ve světě veliký rozmach. V roce 2005 vznikl v České republice na Technické univerzitě v Liberci patent na zvlákňování z volné hladiny a byl vyvinut stroj na průmyslovou výrobu polymerních nanovláken, což podpořilo zájem vědců i průmyslu o tento obor a předznamenalo veliký rozvoj vývoje nanovlákněných materiálů.

3.1 Způsoby výroby nanovláken

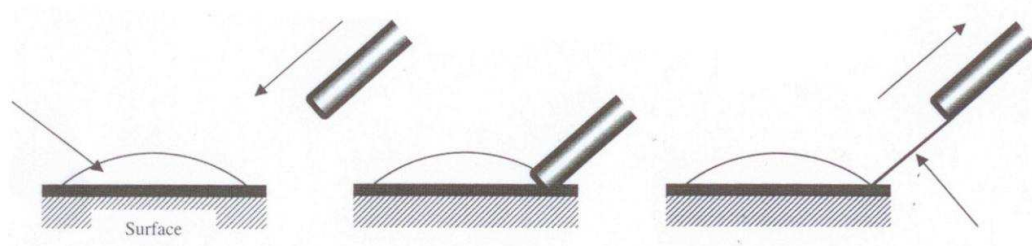
Nanovláknem je délkový textilní útvar, jehož průměr je menší než jeden mikrometr. Vyrábí se zpravidla zvlákňováním tavenin nebo roztoků polymerů. Způsobů výroby nanovláken existuje celá řada. Základem tvorby vlákna je síla, která vlákna vytahuje z polymeru a může jí být dosaženo různými fyzikálními jevy. Různé způsoby výroby budou dále popsány.

3.1.1 Drawing

Drawing, nebo také dloužení, je metoda, při které se pomocí mikropipety vytahují jednotlivá vlákna z kapky tekutého polymeru. Na obrázku 3.1 (str. 18) je znázorněn postup výroby. Mikropipeta je ponořena do kapky polymeru a následně vytažena definovanou rychlostí, což má za následek vytažení malého množství polymeru. Ten

3. Teorie výroby nanovláken

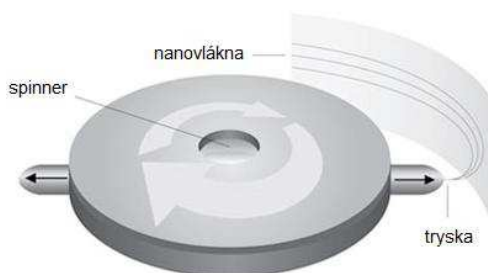
vlivem odpařování rozpouštědla zasychá a vzniká tak velmi tenké vlákno. Výsledná tloušťka vlákna závisí na rychlosti vytahování a rychlosti odpařování rozpouštědla. Tímto způsobem lze vytvářet velmi dlouhá vlákna. Z principu je však patrné, že se jedná o proces nekontinuální a proto se příliš nehodí pro průmyslové využití. Využívá se zejména pro laboratorní technologie. [4][6]



obr. 3.1 Postup výroby dloužením [4]

3.1.2 Forcespinning

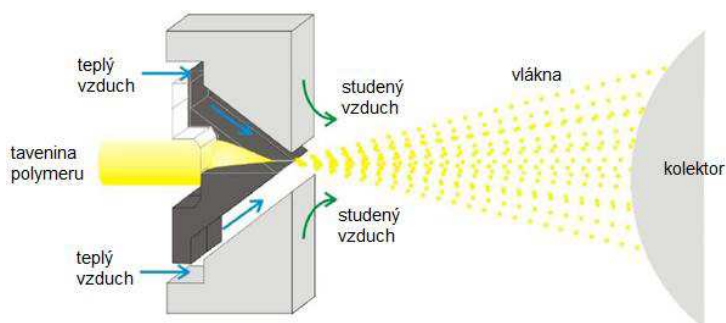
Metoda forcespinning využívá účinků odstředivé síly na tekutý polymer. Spinner je tvořen hlavou, rotující kolem vertikální osy vysokou úhlovou rychlostí. (obr. 3.2) Obsahuje nádržku s polymerem a po obvodu hlavy jsou umístěny trysky směřující do normálového směru. Polymer je odstředivou silou vytahován skrz trysky a rozstříkován do prostoru kolem rotující hlavy. Po opuštění trysky tak vznikají dlouhá nanovlákna, která jsou zachycována na vertikální tyče či pásky umístěné do kruhu kolem spinneru. Tato metoda je poměrně produktivní a má potenciál konkurovat elektrostatickému zvláknování, které bude popsáno v dalších kapitolách. [4][6]



obr. 3.2 Princip metody forcespinning [7]

3.1.3 Melt-blowing

Technologie na obrázku 3.3 využívá energie stlačeného horkého vzduchu. Působením horkého tlakového vzduchu dochází k urychlování taveniny polymeru, která proudí skrz štěrbinu. Během pohybu polymeru dochází k dloužení a chladnutí polymeru, čímž vznikají velmi tenká vlákna. Po opuštění štěrbin jsou nanovlákna nanášena na dopravníkový kolektor. Výsledná tloušťka vláken je závislá na velikosti tlaku, teplotě taveniny a okolí a také velikostí štěrbin a vzdáleností kolektoru od štěrbin. [6]

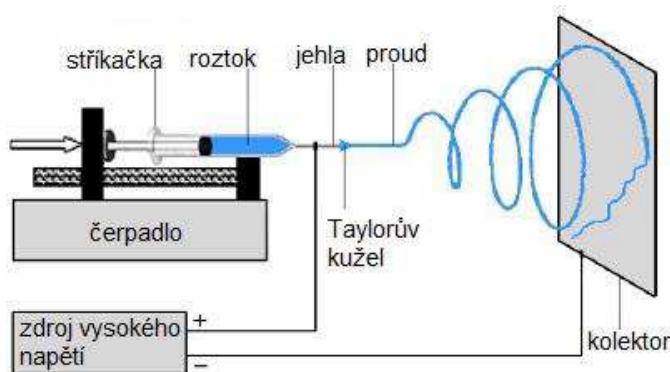


obr. 3.3 Princip metody melt-blowing [6]

3.1.4 Elektrospinning

Elektrospinning nebo také elektrostatické zvlákňování využívá pro výrobu nanovláken energii vysokého elektrického napětí. Jedná se o nejrozšířenější a prozatím nejefektivnější metodu zvlákňování. Využívá se zejména pro průmyslovou výrobu.

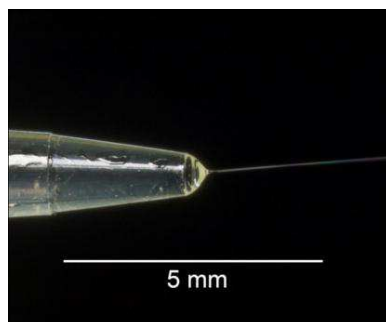
Základem principu, který je zobrazen na obrázku 3.4, jsou dvě elektrody o rozdílných elektrických potenciálech. Zvlákňovací elektroda, na kterou se přivádí polymer je zpravidla připojena na kladný potenciál. Druhá elektroda je nazývána kolektor a připojuje se buď na potenciál záporný nebo nulový. Kolektor je současně opatřen systémem odvodu nanovláknenné vrstvy. Zpravidla to bývá netkaná textilie ve formě pásového dopravníku, na který je vrstva vláken nanášena. [4][6]



obr. 3.4 Princip elektrospinningu [4]

3. Teorie výroby nanovláken

Samotné vlákno vzniká v důsledku působení Coulombovy síly na kapku polymeru. Vlivem vysokého napětí na zvlákňovací elektrodě vzniká v polymeru elektrický náboj. Zvyšováním náboje roste Coulombova síla a v momentě, kdy překoná velikost síly povrchového napětí polymeru, dochází k deformování povrchu kapky a vzniká takzvaný Taylorův kužel (obr. 3.5). [4][6]



obr. 3.5 Taylorův kužel [4]

Při dalším zvýšení síly dochází k vytahování polymeru z Taylorova kužele, který se dále přemísťuje na elektrodu s nižším potenciálem, tedy na kolektor. Rychlost proudu polymeru se během přemísťování v elektrickém poli zvyšuje a nastává tak dloužení, v jehož důsledku dochází ke zmenšování průměru. Současně dochází vlivem odpařování rozpouštědla k zasychání polymeru a vzniká tak velmi tenké vlákno. [4][6]

3.1.5 Zvlákňování účinkem střídavého proudu

Způsob zvlákňování účinkem střídavého proudu byl vyvinut na Technické univerzitě v Liberci v roce 2012. Podstatou této metody je ionizování vzduchu či jiného plynu v okolí elektrody. Elektrické pole se tak vytváří mezi elektrodou a ionty plynu vytvořenými v okolí elektrody. Dle fáze elektrického pole dochází na elektrodě k vytváření nanovláken s opačným elektrickým nábojem. Vzniklá nanovlákná se působením elektrostatických sil shlukují do lineárního útvaru a pohybují se prostorem ve směru gradientu elektrického pole. [8]

3.2 Používané typy elektrod

Elektroda je základním článkem ústrojí pro výrobu nanovláken pomocí metody elektrospinningu. Její konstrukce zásadně ovlivňuje proces tvorby nanovláken. Ovlivňuje zejména jemnost výsledných vláken a má také zásadní vliv na produktivitu. Důležitou veličinou, která je sledována a podílí se na výsledné produktivitě a struktuře vláken, je intenzita elektrického pole. Zpravidla platí, že s rostoucí intenzitou roste výrobnost ale také dochází ke snižování jemnosti vyrobených vláken. [9, kap. 3.3]

Vývoj zvlákňovacích elektrod je v současné době stále v začátcích a je zde stále veliký prostor pro vývoj nových typů a jejich optimalizaci. Existuje však již několik typů používaných elektrod, které budou popsány v následujících kapitolách.

3.2.1 Zvlákňovací tryska

Zvlákňovací tryska je první elektrodou použitou pro výrobu nanovláken elektrostatickým zvlákňováním. Jedná se o úzkou trubičku (kapiláru), skrze kterou proudí polymer od přívodní hadičky na ústí kapiláry. Znázorněno na obrázku 3.6 Na výstupu z trysky je vysoká intenzita elektrického pole a dochází tak k tvorbě vláken. Výhodou této elektrody je její jednoduchost. Nevýhodou je nízká produktivita, protože zvlákňovací povrch je velmi malý a vzniká velmi málo vláken. Proto není pro průmyslové využití příliš vhodná a je používána spíše pro laboratorní účely.



obr. 3.6 Zvlákňovací tryska [4]

3.2.2 Vícetrysková elektroda

Vícetrysková elektroda je snahou o zvýšení produktivity výroby nanovláken. Je použito více trysek umístěných vedle sebe v jedné či více řadách (obrázky 3.7 a 3.8). Více trysek tak vyrobí více vláken. Přesto však se tato elektroda taktéž používá spíše pro laboratorní účely. Trysek by musely být tisíce, aby byla produktivita vláken na úrovni průmyslového využití. Tato elektroda má také nevýhodu v tom, že jednotlivé trysky se při nevhodně zvolených vzdálenostech mohou navzájem negativně ovlivňovat z hlediska rozložení intenzity elektrického pole.



obr. 3.7 vícetrysková elektroda jednořadá [6]



obr. 3.8 vícetrysková elektroda dvouřadá [4]

3.2.3 Elektroda pro zvlákňování z volné hladiny

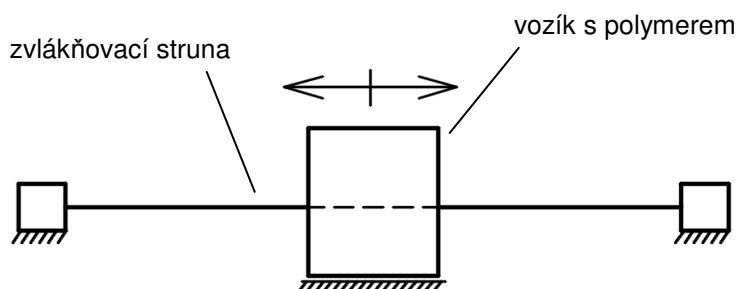
Elektroda pro zvlákňování z volné hladiny byla vyvinuta v roce 2005 na Katedře netkaných textilií Technické univerzity v Liberci ve spolupráci s firmou Elmarco. Vyvinutí této elektrody znamenalo přelom v průmyslové výrobě nanovláken pomocí elektrospinningu. Elektroda využívá základního poznatku, že lze zvlákňovat nejen z hrotu kapiláry, ale také z tenké vrstvy polymeru. Skládá se z otáčejícího se válečku, který je z části ponořen do roztoku polymeru. Otáčením dochází k nanášení tenké vrstvy polymeru na váleček. Jak je patrné z obrázku 3.9, dochází na této elektrodě k vysoce produktivnímu zvlákňování. Proto je tento princip využíván pro průmyslovou výrobu nanovláken a využívají ho stroje společnosti Elmarco, známé pod názvem Nanospider.



obr. 3.9 Elektroda pro zvlákňování z volné hladiny [10]

3.2.3 Strunová elektroda

Strunová elektroda byla vyvinuta společností Elmarco, která ji taktéž využívá ve svých strojích Nanospider. Jedná se o elektrodu vytvořenou z tenkého drátu, na kterou je prostřednictvím pojíždějícího vozíku nanášena tenká vrstva polymeru. Princip znázorněn na obrázku 3.10. Vlivem malého průměru drátu je na jeho povrchu vysoká hodnota intenzity elektrického pole a dochází tak k velmi vysoké produkci vláken, jak je patrné z obrázku 3.11.



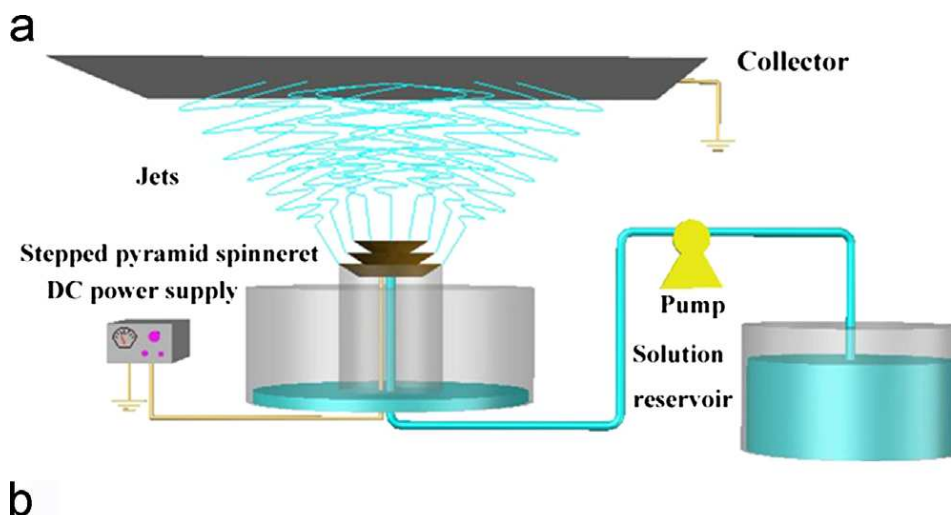
obr. 3.10 Princip strunové elektrody [10]



obr. 3.11 Strunová elektroda [10]

3.2.4 Vícetupňová elektroda

Elektroda, zobrazená na obrázku 3.12, používaná pro elektrostatické zvlákňování, byla zkoumána v poměrně nedávné době na univerzitě v Číně. Podstata spočívá v sesazení více elektrod ve tvaru misky do podoby jedné elektrody. Na okrajích misek jsou vytvořeny ostré hrany. Na ostrých hranách je vysoká intenzita elektrického pole, v důsledku čehož dochází k vysoké produkci nanovláken. [11]



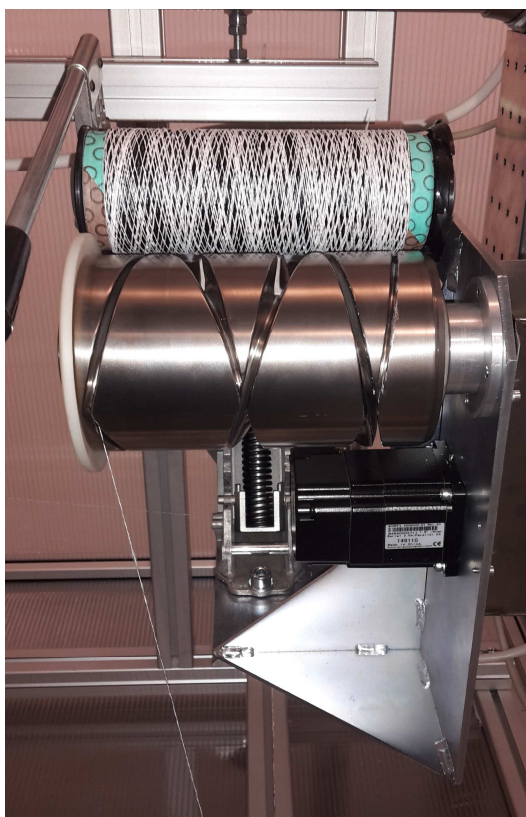
obr. 3.12 Schéma výroby nanovláken vícetupňovou elektrodou [11]

4 Návrh vhodného systému navíjení

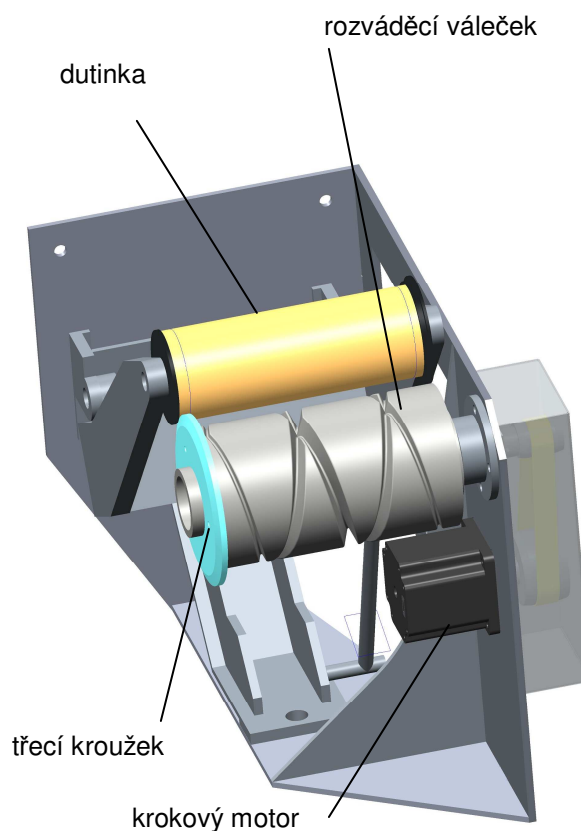
4.1 Současný stav

U současného navíjecího ústrojí, používaného na stroji, je pro rozvádění příze použito rozváděcího válečku, viz obrázky 4.1 a 4.2. Tento způsob rozvádění je nevyhovující, neboť při průchodu příze drážkou dochází ke tření mezi drážkou a přízí, což způsobuje nežádoucí strhávání vrstvy nanovláken z příze, které se v návínu cyklicky opakuje. Tento jev je patrný z obrázku 4.3. Proto je nutné navrhnout systém, který minimalizuje třecí účinky na přízi při rozvádění.

Přenos krouticího momentu na navíjenou cívku je proveden prostřednictvím třecího kroužku, připevněného na rozváděcí váleček. Je tak učiněno proto, že v případě přímého kontaktu s rozváděcím válečkem dochází vlivem přtlaku rozváděcího válce k „rozválcování“ příze, tedy ke zplošťování jejího průřezu. Z toho důvodu lze navíjet návín o omezeném průměru. Konkrétně je navíjení koncipováno pro návín s průměrem do 80 milimetrů, což je pro potřebu výroby laboratorních vzorků s nanopřízí dostačující a tento parametr může být pro novou konstrukci zachován.

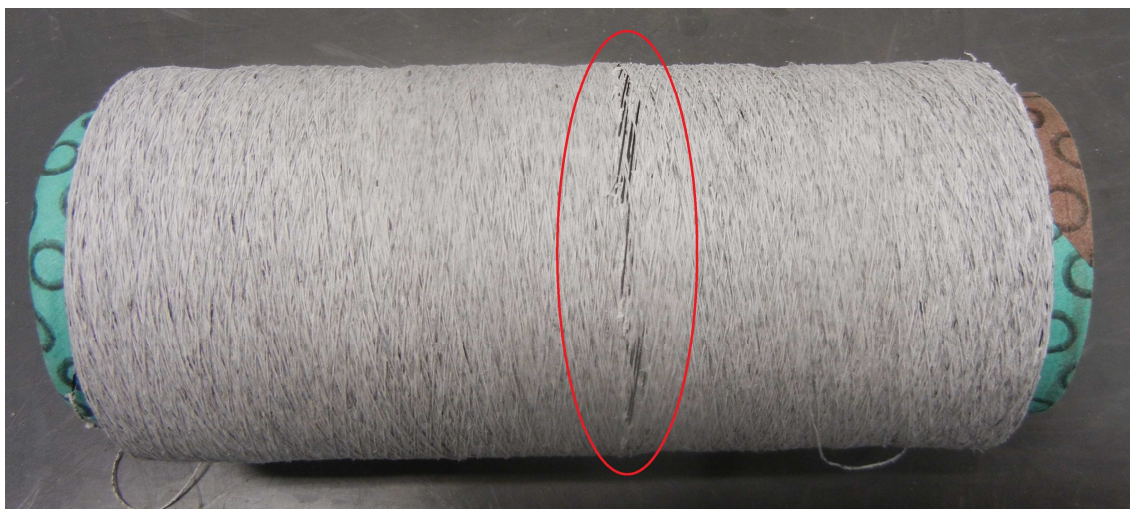


obr. 4.1 Fotografie současného navíjecího ústrojí



obr. 4.2 Model současného navíjecího ústrojí

4. Návrh vhodného systému navíjení



obr. 4.3 Chyba návínu

4.2 Konstrukce nového navíjecího systému

Stroj, pro který byl nový systém navíjení navrhován, je koncipován jako funkční model, určený zejména pro laboratorní účely. Z toho důvodu nebyly na navíjecí systém kladeny vysoké nároky z hlediska dlouhodobé životnosti, optimalizace nákladů na výrobu a produktivity. Rozváděcí váleček se u současného navíjecího systému neosvědčil, proto pro nový systém bylo vybráno rozvádění pomocí řemínkového mechanismu. Princip řemínkového rozvádění byl popsán v kapitole 2.2.1.

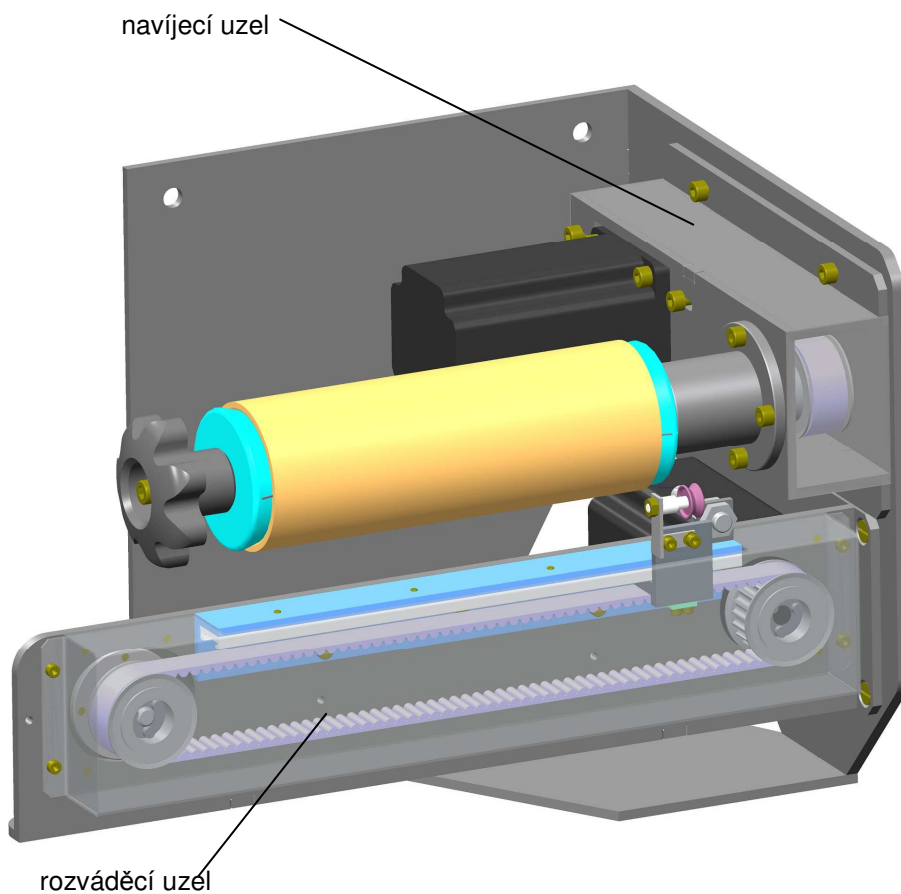
Důležitým požadavkem na konstrukci, zejména pro rozváděcí mechanismus, bylo snížení účinku třecích sil na přízi během rozvádění. Z toho důvodu se nabízí použití valivé vazby mezi přízí a rozváděcím elementem. Lze toho dosáhnout například kladíčkou, ve které bude příze při rozvádění vedena.

Jak bylo již zmíněno v předchozí kapitole, navíjecí systém má být koncipován pro tvorbu testovacích vzorků o průměru návínu do 80 milimetrů. Z tohoto důvodu nebude nutné řešit oddalování cívky od rozváděcího bodu.

Na obrázku 4.4 je znázorněno kompletní navržené navíjecí ústrojí složené ze dvou celků. Jedním je rozváděcí uzel s řemínkovým mechanismem, poháněným krokovým motorem. Druhým je navíjecí uzel, který je řešen nezávisle na rozvádění a cívka je tedy naháněna samostatným krokovým motorem. Jednotlivé konstrukční uzly jsou popsány v následujících kapitolách.

4. Návrh vhodného systému navíjení

Oba konstrukční celky jsou na ocelovém rámu umístěny nezávisle na sobě, což do budoucna nabízí možnost usadit navíjecí uzel na mechanismus, který by zajišťoval oddalování cívky od rozváděcího bodu. Toto však bude nutné řešit v případě přechodu od navíjení laboratorních vzorků na výrobu plnohodnotných návinů pro průmyslové využití. Tato problematika však není předmětem této práce a nebude tedy dále řešena.

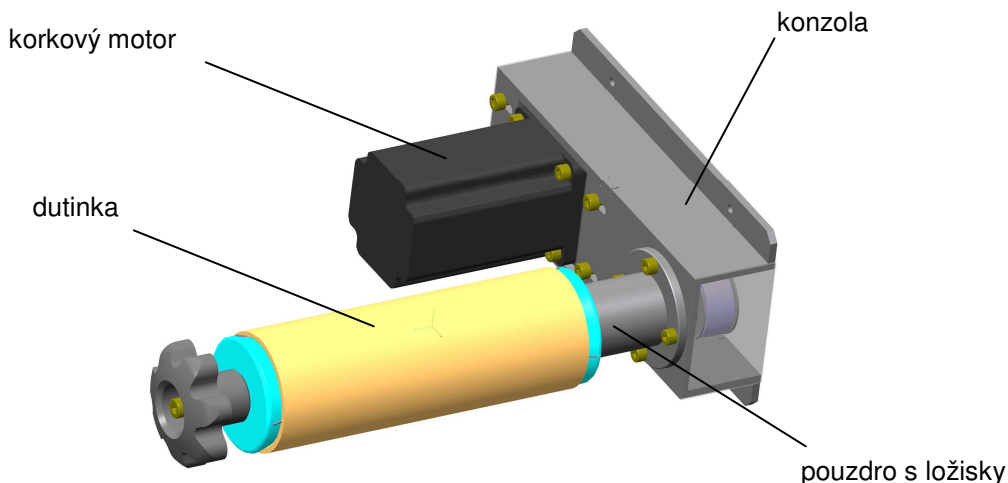


obr. 4.4 Model navíjecího ústrojí

4. Návrh vhodného systému navíjení

4.2.1 Navíjecí uzel

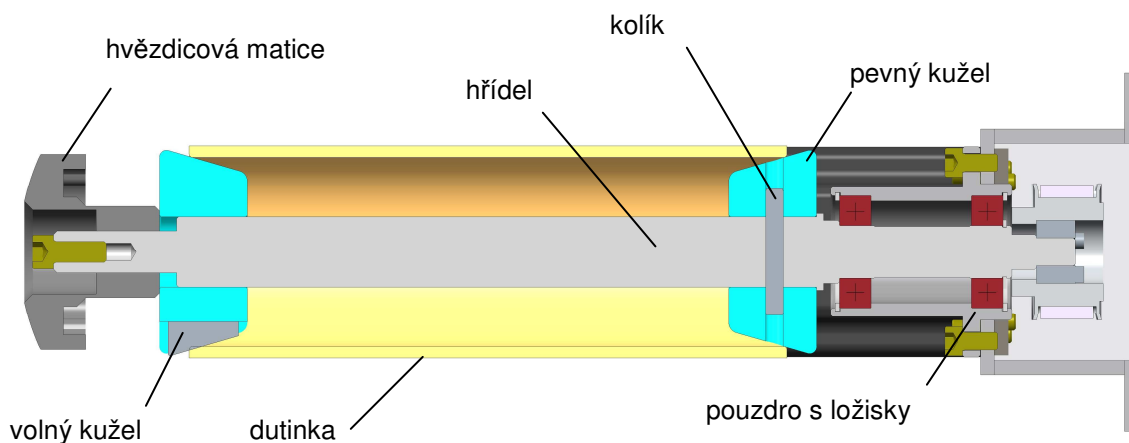
Navíjecí uzel na obrázku 4.5 je na rám navíjecího ústrojí připevněn prostřednictvím svažené konzole. Na této konzole je pomocí šroubových spojů připevněno pouzdro s ložisky. V ložiscích je uložen hřídel, na nějž je možné nasadit dutinku. Blíže znázorněno na obrázku 4.6.



obr. 4.5 Navíjecí uzel

Dutinka s návinem je upevněna mezi dva kužely, přičemž jeden je pevně uložen na hřídeli a zajištěn kolíkem. Tímto kuželem tedy dochází k přenosu krouticího momentu na dutinku. Druhý kužel je nasazován na hřídel volně a je dotahován hvězdicovou maticí. Oba kužely jsou po obvodu opatřeny třemi tenkými plíškami, vyčnívajícími nad povrchu kuželů. Po dotažení matice dojde k zaříznutí plíšků do dutinky, čímž se zamezí případnému proklouznutí cívky na kuželech.

Do hřídele je na konci zašroubován a vlepen šroub s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem, který pomocí klíče slouží obsluze k zamezení otáčení hřídele s dutinkou během dotahování a povolování matice. Bez této možnosti zajištění by, zejména při povolování matice za účelem sejmutí plné cívky, byla obsluha nucena zamezit otáčení

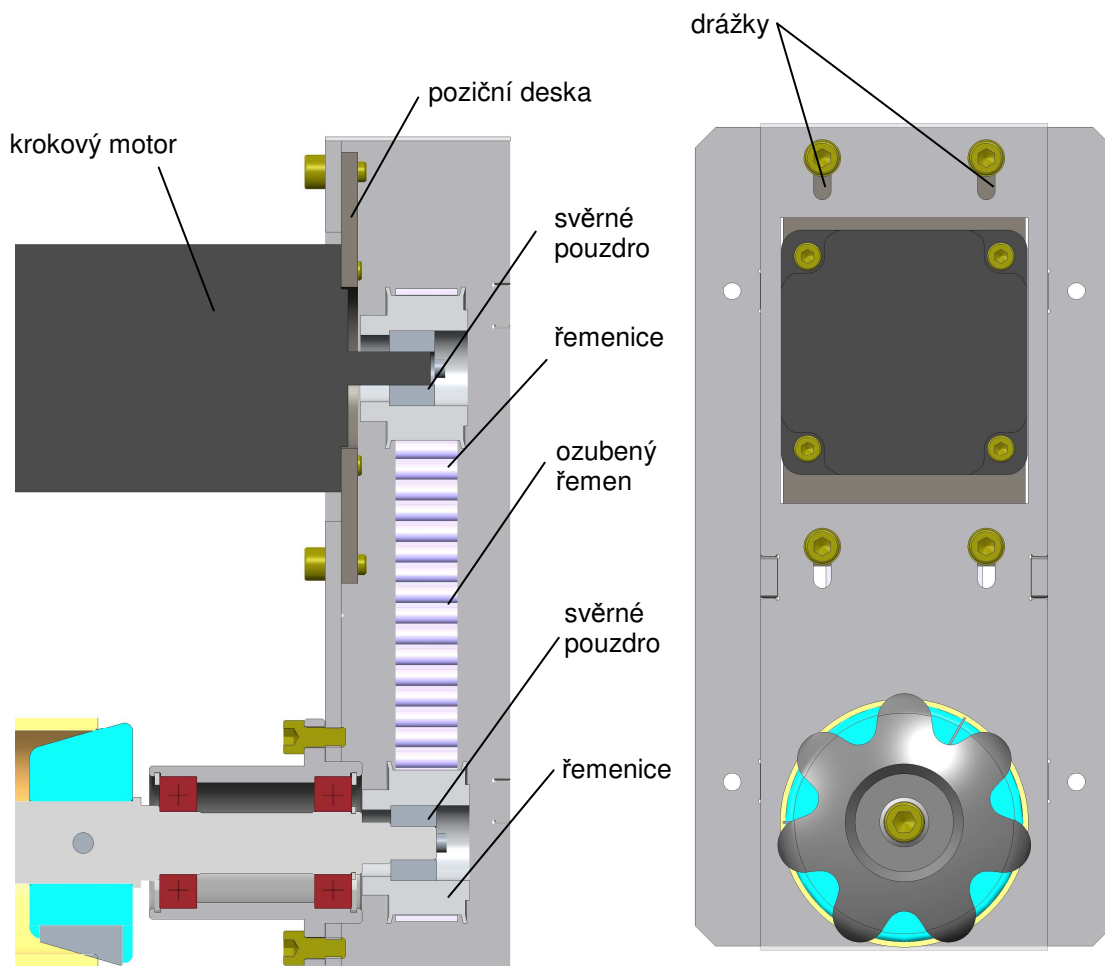


obr. 4.6 Řez navíjecím uzlem

4. Návrh vhodného systému navíjení

trnu pomocí vlastní ruky přidržení cívky přímo za povrch návinu, čímž by mohlo dojít k případnému poškození nanovlákněné vrstvy.

Přenos krouticího momentu od krokového motoru na hřídel s dutinkou je proveden prostřednictvím ozubeného řemenu. Ozubené řemenice jsou na hřídeli motoru a cívkovém hřídeli upevněny pomocí svěrných pouzder TLK 350 8x18. Krokový motor je ke konzole navíjecího uzlu připevněn prostřednictvím poziční desky, která je ke konzole připevněna prostřednictvím šroubů skrz drážky v konzole. Prostřednictvím drážek se může motor posouvat a lze tak měnit osovou vzdálenost řemenic. Je tak učiněno pro zajištění snadného nasazení řemene. Znázorněno na obrázku 4.7

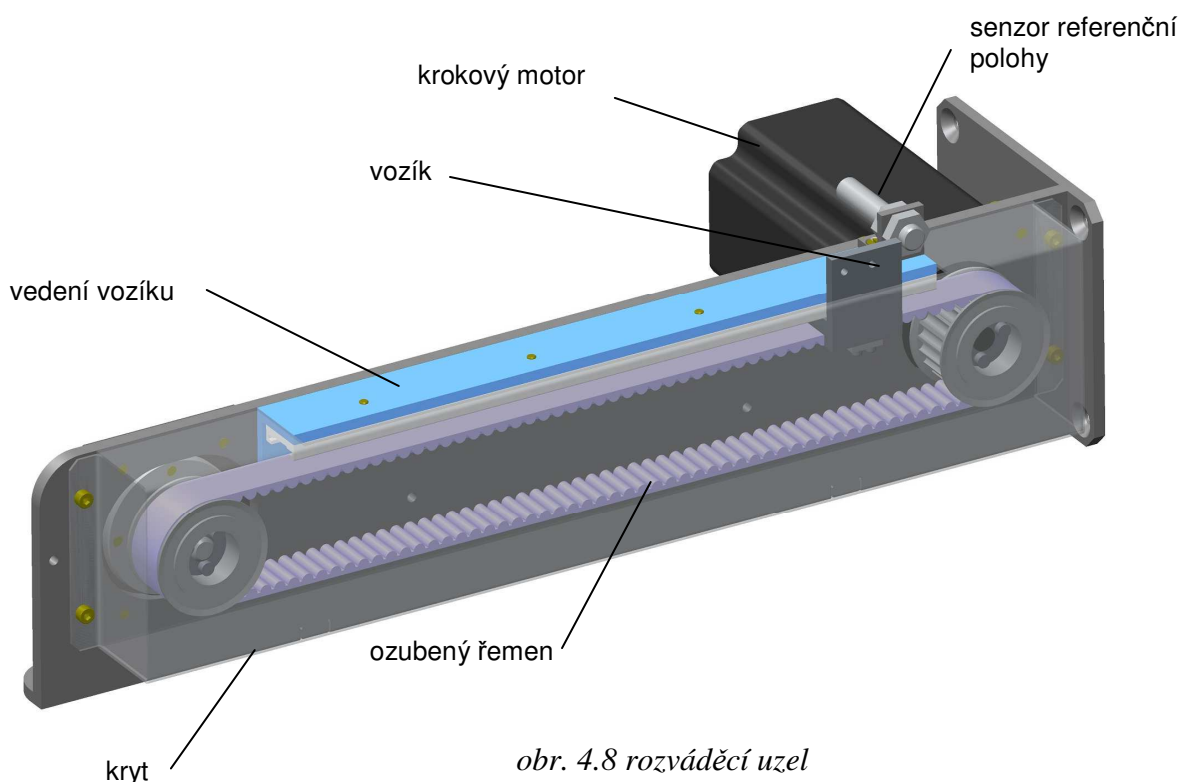


obr. 4.7 Navíjecí uzel

4.2.2 Rozváděcí uzel

Základem rozváděcího uzlu, zobrazeného na obrázku 4.8, je pojízdný vozík, který koná rozváděcí pohyb a je uložen na lineárním vedení DryLin N, vyráběném a dodávaném firmou Igus. Vozík je opatřen dvěma závity M3, které slouží pro připevnění rozváděcího elementu. Problematika a konstrukce rozváděcích elementů je řešena v další kapitole.

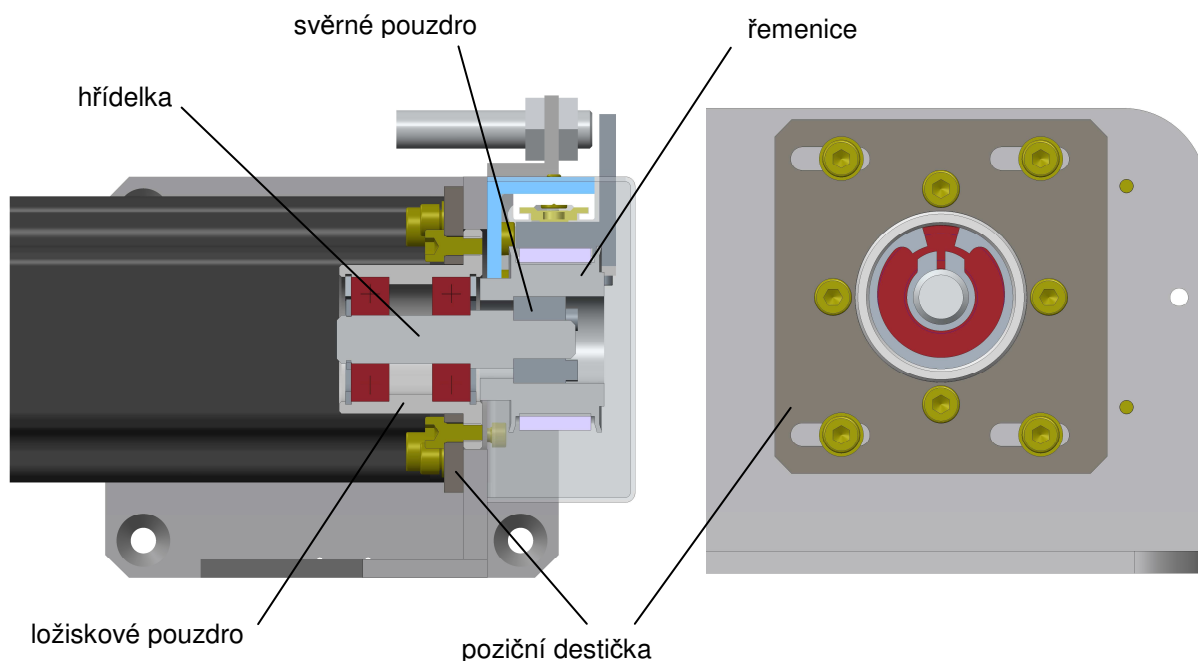
Rozváděcího pohybu je docíleno prostřednictvím ozubeného řemenu, který je poháněn řízeným krokovým motorem. Důležitou součástí pro řízení krokového motoru je indukční senzor, jenž má za úkol indikovat referenční polohu pro správné nastavení rozváděcího pohybu. Senzor se nachází na kraji vedení vozíku. Rozváděcí ústrojí je doplněno krytem, zajišťujícím ochranu před nechtěným vniknutím cizích těles do rozváděcího mechanismu. Slouží tedy pro zajištění větší bezpečnosti obsluhy.



Ozubené řemenice jsou rovněž jako u navíjecí části připevněny na hřídele pomocí svěrných pouzder TLK 350 8x18. Jedna z řemenic je připevněna přímo na hřídel krokového motoru. Druhá je na hřídeli, který se otáčí v ložiscích v ložiskovém domku. Na obrázku 4.9 (str. 30) je uložení druhé řemenice zobrazeno podrobněji. Z obrázku je patrné, že ložiskový domek je upevněn obdobně jako motor u navíjecí části na poziční

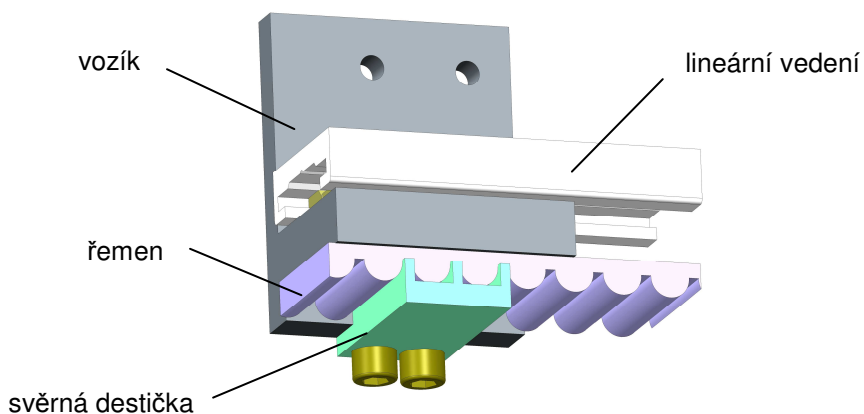
4. Návrh vhodného systému navíjení

desku, která je opatřena drážkami pro zajištění posouvání celého uložení řemenice. Tím taktéž dochází ke změně osové vzdálenosti řemenic, což stejně jako u navíjecího uzlu slouží pro snadnou instalaci řemenu a jeho napnutí.



obr. 4.9 uložení řemenice

Na obrázku 4.10 je znázorněn princip uchycení vozíku k řemenu. Řemen je k vozíku připevněn pomocí svěrné destičky, která je opatřena drážkami, do nichž zapadají zuby řemenu. Vzdálenost mezi plochou vozíku, s níž je řemen v kontaktu, a ploškami výstupků svěrné destičky je menší, než je tloušťka nosného průřezu řemenu. V důsledku toho dochází při smontování k bezpečnému sevření řemenu mezi vozíkem a destičkou.



obr. 4.10 Uchycení řemenu k vozíku

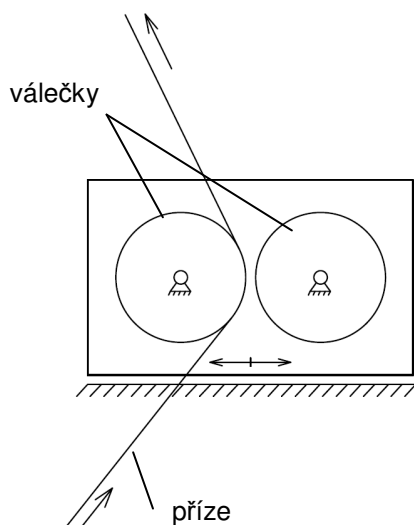
4.2.3 Volba rozváděcího elementu

Rozváděcí element by měl být navržen tak, aby minimalizoval riziko strhávání vláken z příze a došlo ke zlepšení oproti současnému stavu, (kapitola 4.1). Standardní rozváděcí elementy proto nejsou příliš vhodné a nabízí se tedy použití elementu, po kterém by se příze odvalovala, tedy využití například kladičky. Způsobů řešení bylo navrženo více, z nichž jeden byl vybrán pro odzkoušení.

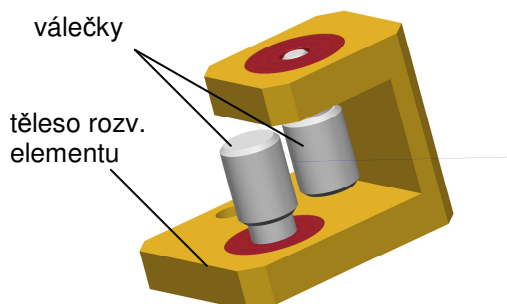
Rozváděcí element se dvěma válečky

Prvním z navržených systémů, jehož schéma je na obrázku 4.11 je element se dvěma válečky v ložiscích. Na obrázku 4.12 je znázorněn konkrétní navržený element.

Příze je při pohybu rozváděcího elementu vedena vždy jedním válečkem podle toho, na kterou stranu se pohybuje. Válečky nejsou hnané a roztáčejí se pouze pomocí pohybu příze. Mezera mezi válečky nemůže být stejná jako je průměr příze, nebo dokonce menší, neboť by vyvíjela na přízi tlak. Není to možné opět z důvodu nežádoucího „rozválcování“ příze. Proto musí být o něco větší a v každé úvratí tak dochází k předávání příze z jednoho válečku na druhý. Z tohoto hlediska je tento systém nevýhodný, protože při předávání příze mezi válečky musí nutně dojít k roztočení válečku z nulové úhlové rychlosti na rychlost danou poloměrem válečku a rychlostí příze. V momentě dotyku příze se stojícím válečkem by mohlo v podstatě dojít ke krátkodobému smýkání, což by opět mohlo mít negativní následek v podobě poškození vrstvy nanovláken. Tento princip tedy nebyl do konstrukce navíjecího zařízení zvolen a bylo třeba navrhnout jiný způsob vedení příze.



obr. 4.11 schéma elementu se dvěma válečky



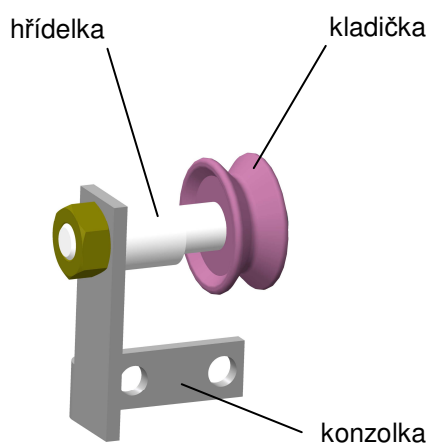
obr. 4.12 rozváděcí element se dvěma válečky

Rozváděcí element s kladičkou

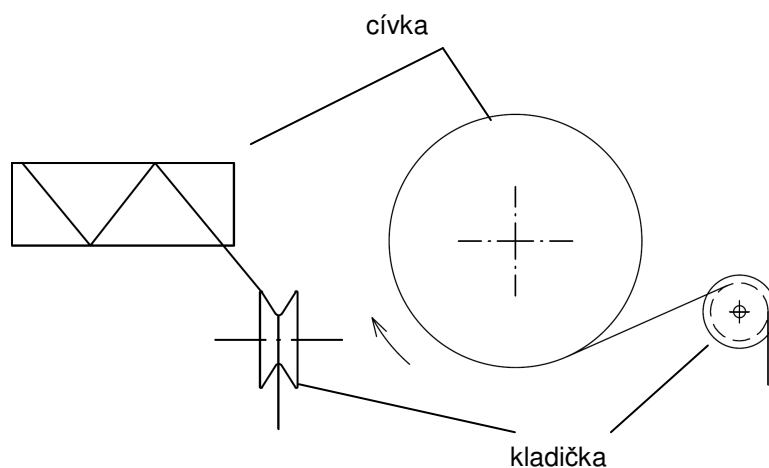
Rozváděcí element, zobrazený na obrázku 4.13, využívá pro rozvádění příze keramickou kladičku, která se prostřednictvím ložiska volně otáčí na hřídelce a ta je přichycena na konzolce. Celý element je umístěn na vozík rozváděcího ústrojí, s nímž je spojen pomocí dvou šroubů. Výhodou tohoto řešení je, že se během rozvádění kladka stále otáčí stejným směrem bez zastavování a příze je s ní stále v kontaktu. Tento princip tedy nabízí řešení problematiky strhávání vláken z příze, neboť třecí účinky mezi rotující kladičkou a přízí jsou zanedbatelné.

Bylo také třeba počítat s rizikem, že bude docházet ke spadávání příze z kladičky. K tomuto jevu může docházet zejména při vyšších požadovaných rychlostech rozvádění, potažmo vysokého zrychlení v úvratích. Aby k tomu nedocházelo, je potřeba dostatečného opásání kladičky přízí. Proto byl celý systém rozvádění navržen tak, že osa kladičky byla posazena nad pomyslnou spodní horizontální tečnu cívky, aby příze mohla být navíjena principem znázorněným na obrázku 4.14. Riziko spadávání však může být podstatné až při případném použití navíjecího ústrojí pro průmyslovou výrobu. V současném stavu stroje, kdy se navíjí pouze malé laboratorní vzorky, není riziko tak podstatné, neboť je rozváděcí rychlost velmi malá a ke spadávání by nemělo docházet. Pro případné vyšší rychlosti rozvádění by bylo možné použít systém, který bude popsán v následující kapitole.

Rozváděcí element s jednou kladičkou byl vybrán do finální konstrukce navíjecího ústrojí a byl podroben testování..



obr. 4.13 Rozváděcí element
s kladičkou

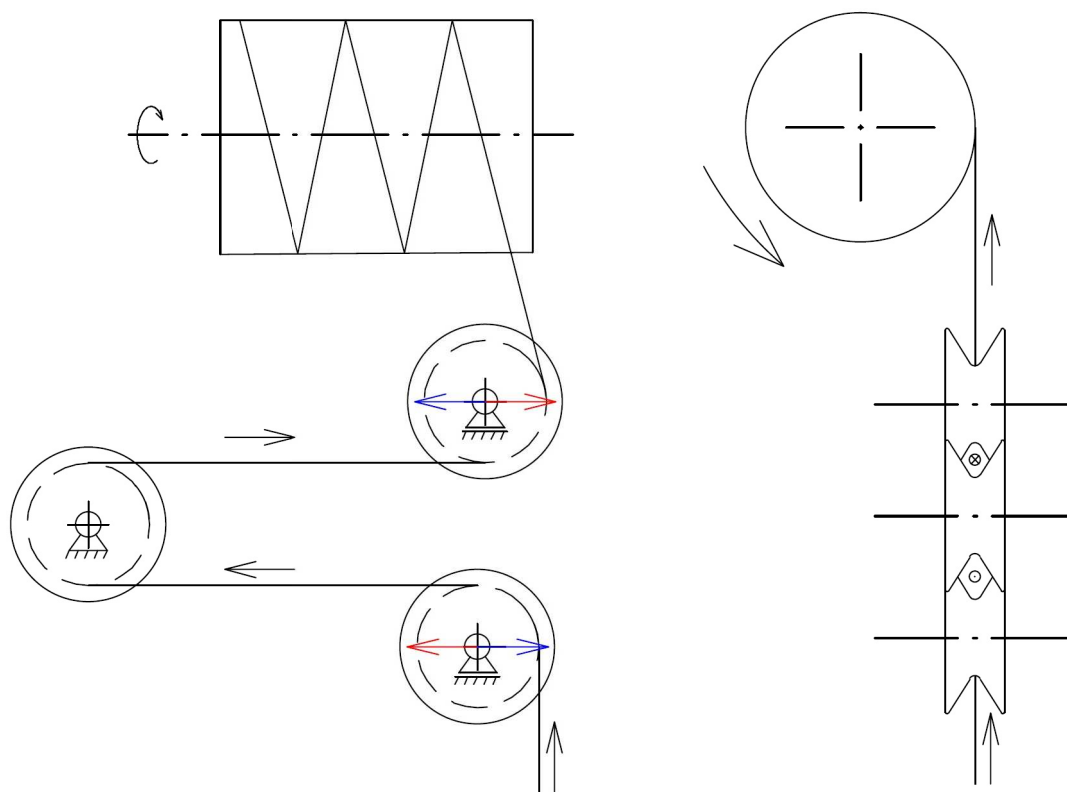


obr. 4.14 schéma navíjení příze

4. Návrh vhodného systému navíjení

Rozváděcí element s kladičkou a podáváním z boku

Dalším možným řešením, jehož schéma je na obrázku 4.15, je podávání příze na kladičku z boku. Osa kladičky je mimoběžná s osou rotace cívky. U tohoto systému je taktéž příze stále v kontaktu s rozváděcí kladičkou, ke smýkání tedy nedochází a také by z principu nemělo hrozit riziko spadávání příze přes čelo kladičky.



obr. 4.15 schéma rozváděcího elementu s podáváním z boku

Nevýhodou však je, že vlivem změny směru rozváděcí rychlosti dochází ke změně rychlosti odtahu navíjené příze. Proto je nutné změnu rychlosti kompenzovat druhou kladičkou, přes kterou je příze taktéž vedena a je nutné aby se pohybovala v opačném smyslu ke kladičce rozváděcí, jak je naznačeno v obrázku 4.15. Tento princip celý rozváděcí uzel mírně komplikuje a také prodražuje, neboť je třeba dalšího lineárního vedení, stejně tak vozíku a rozváděcího elementu.

V případě potřeby je možné navrženou konstrukci navíjecího ústrojí doplnit o druhé vedení s vozíkem bez nutností podstatného zásahu do konstrukce.

4.3 Výpočty provedené u navíjecího ústrojí

Konstrukce navíjecího ústrojí se neobejde bez některých základních výpočtů, jako jsou například parametry rozvádění či maximální zrychlení motoru. Jelikož se jedná o funkční model, nebylo třeba provádět žádné pevnostní analýzy a optimalizace. Proto byly součástí konstrukce z pevnostního hlediska, s ohledem na minimální síly působící na konstrukci, dostatečně naddimenzovány dle zkušeností, po konzultaci s vedoucím práce. Všechny provedené výpočty jsou dále popsány.

4.3.1 Výpočet maximálního zdvihu rozváděcího elementu

Pro správné rozvádění je potřeba, aby rozváděcí element při pohybu přesáhl šířku návínu o určitou vzdálenost, protože při procesu rozvádění dochází k vlečení příze za rozváděcím elementem.

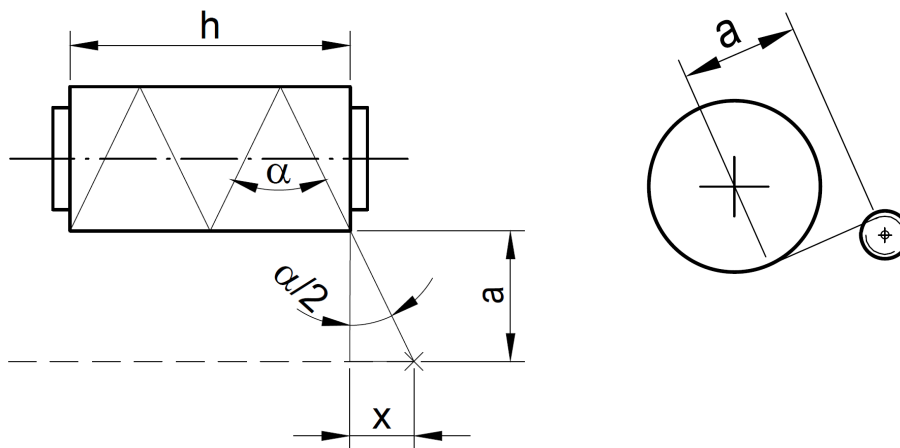
U nehmotných systémů rozvádění rozváděcím válečkem není bod rozvádění vzdálen od povrchu cívky a dochází ke kladení příze přímo v místě styku rozváděcího válečku s návínem. V úvratích se příze pohybuje s vysokým zrychlením a úhel křížení se na krajích návínu prakticky nemění.

U hmotných systémů rozvádění vždy dochází v úvratích ke zpomalení rozváděcího elementu tím ke zmenšování úhlu křížení, který je na krajích návínu nulový. Skutečný průběh úhlu křížení v úvratích závisí na rychlostních poměrech navíjení a rozvádění. Výpočet takového průběhu je na základě těchto parametrů obtížné provést. Z tohoto důvodu bylo pro výpočet použito teoretické hodnoty úhlu křížení, které by mohlo být dosaženo pro případ nehmotného systému rozvádění.

Na obrázku 4.16 vlevo je znázorněno schéma, ze kterého se výpočet odvíjí. Vzdálenost x je právě teoretický přesah, o který by měl být rozváděcí pohyb delší oproti potřebné šířce návínu h . Závisí na úhlu křížení α , jehož limitní hodnota byla zvolena na 40° . Náviny s větším úhlem se zpravidla nenavíjejí. Závisí také na vzdálenosti a , která je nejkratší spojnici mezi povrchem cívky a povrchem kladičky, přičemž je k oběma povrchům tečná; znázorněno na obrázku 4.16 vpravo. Tato vzdálenost byla odměřena přímo z modelu a nabývá hodnoty 30 milimetrů. Během navíjení sice vzdálenost a klesá v závislosti na průměru návínu, avšak pro návrh je podstatná hodnota maximální, což odpovídá stavu prázdné dutinky.

4. Návrh vhodného systému navíjení

Dle vztahu 4.1 byla vzdálenost x vypočtena na hodnotu 10,9 milimetru. Šířka návinu h zpravidla bývá 148 milimetrů, což bylo v konstrukci uvažováno. Navržené lineární vedení vozíku je s ohledem na další konstrukční požadavky ve skutečnosti dlouhé 230 milimetrů, což je tedy pro přejetí na obou stranách návinu plně dostatečné.



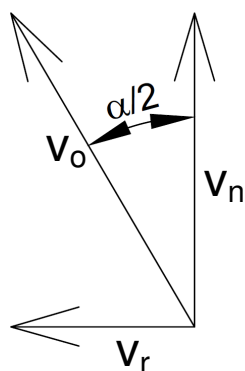
obr. 4.16 výpočtové schéma

$$x = a \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) = 30 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{40}{2}\right) = 10,9 \text{ mm} \quad (4.1)$$

x	[m]	přesah rozváděcího bodu
a	[m]	průmět délky příze tečna - tečna
α	[°]	úhel křížení
h	[m]	šířka návinu

4.3.2 Výpočet rychlostních poměrů

Tato kapitola se věnuje výpočtu rychlosti navíjení a rychlosti rozvádění, potažmo otáček krokových motorů, pro požadovanou rychlost příze a úhel křížení. Odtahová rychlost příze je daná technologií výroby příze a v současném stavu se pohybuje od 20 do 40 metrů za minutu. Na obrázku 4.17 je zobrazen rozklad rychlostí navíjené příze na rychlost navíjecí, tedy obvodovou rychlost cívky a rychlost rozváděcí. Dle výpočtů 4.2 až 4.5 je možné určit otáčky pro řízení krokových motorů. Z principu navrženého navíjecího mechanismu vyplývá, že vlivem nárůstu průměru návinu se bude při konstantních otáčkách motoru měnit obvodová rychlost cívky. Změna rychlosti zásadně neovlivní výrobní technologii, což bylo ověřeno u stávajícího navíjecího ústrojí.



obr. 4.17 rozklad rychlostí na přízi

$$v_n = v_o \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (4.2)$$

$$v_r = v_o \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (4.3)$$

$$n_n = \frac{60 \cdot v_n}{2 \cdot \pi \cdot r_d} \quad (4.4)$$

$$n_r = \frac{60 \cdot v_r}{2 \cdot \pi \cdot r_{rem}} \quad (4.5)$$

v_n	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	navíjecí rychlost
v_r	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	ustálená rozváděcí rychlost
n_n	$[\text{min}^{-1}]$	otáčky motoru navíjecího uzlu
n_r	$[\text{min}^{-1}]$	ustálené otáčky motoru rozváděcího uzlu
α	$[\text{°}]$	počáteční úhel křížení
r_d	$[\text{mm}]$	poloměr prázdné dutinky
r_{rem}	$[\text{mm}]$	poloměr řemenice

4.3.3 Maximální zrychlení krokového motoru

Pro řízení rozvádění je důležité určit, jakého maximálního zrychlení může krokový motor dosáhnout při dynamickém zatížení, daném poháněnou soustavou, v tomto případě řemínkovým rozváděcím mechanismem. Pro výpočet zrychlení je nutné znát moment setrvačnosti redukovaný na hřídel rotoru, který byl vypočítán pomocí rovnosti kinetických energií dle vztahů 4.6 až 4.9. Redukovaný moment byl spočítán jak pro variantu s jedním vozíkem tak i pro variantu se dvěma vozíky.

Pro pohon řemínku byl použit krokový motor *Masmot 80MPF 3,25* a všechny potřebné údaje týkající se motoru byly odečteny z manuálu motoru [12].

Další potřebné parametry, jako moment setrvačnosti řemenic, svěrných pouzder a hmotnost vozíku, byly zjištěny přímo z modelu v konstrukčním programu *creo parametric*.

$$\frac{1}{2} J_{RED} \cdot \omega^2 = \frac{1}{2} J_{rot} \cdot \omega^2 + 2 \cdot \frac{1}{2} J_{sv} \cdot \omega^2 + 2 \cdot \frac{1}{2} J_{řem} \cdot \omega^2 + \frac{1}{2} J_{hř} \cdot \omega^2 + \frac{1}{2} m \cdot v_r^2 \quad (4.6)$$

$$J_{RED} = J_{rot} + 2 \cdot J_{sv} + 2 \cdot J_{řem} + J_{hř} + m \cdot \frac{v_r^2}{\omega^2} \quad (4.7)$$

$$v_r = \omega \cdot r \quad (4.8)$$

$$\underline{J_{RED} = J_{rot} + 2 \cdot J_{sv} + 2 \cdot J_{řem} + J_{hř} + m \cdot r_{řem}^2} \quad (4.9)$$

Redukovaný moment pro jeden vozík:

$$J_{RED} = 4,4 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot 0,9 \cdot 10^{-7} + 2 \cdot 1,85 \cdot 10^{-5} + 1,4 \cdot 10^{-7} + 0,050 \cdot 0,0175^2$$

$$\underline{\underline{J_{RED} = 9,7 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2}} \quad (4.10)$$

Redukovaný moment pro dva vozíky:

$$J_{RED} = 4,4 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot 0,9 \cdot 10^{-7} + 2 \cdot 1,85 \cdot 10^{-5} + 1,4 \cdot 10^{-7} + 0,1 \cdot 0,0175^2$$

$$\underline{\underline{J_{RED} = 1,12 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2}} \quad (4.11)$$

J_{RED} [kg·m²] moment redukovaný na hřídel motoru

J_{rot} [kg·m²] moment setrvačnosti rotoru motoru [12 str. 43]

4. Návrh vhodného systému navíjení

J_{sv} [kg·m²] moment setrvačnosti svěrného pouzdra

$J_{řem}$ [kg·m²] moment setrvačnosti řemenice

$J_{hř}$ [kg·m²] moment setrvačnosti hřídele

m [kg] hmotnost vozíku

$r_{řem}$ [m] poloměr řemenice

Z výpočtů 4.10 a 4.11 vyplývá, že rozdíl redukováného momentu při variantě s jedním vozíkem oproti momentu u varianty se dvěma není příliš velký, proto byla pro další dimenzování vzata hodnota vyšší a zaokrouhlena na hodnotu $1,2 \cdot 10^{-4}$ kg·m².

Zrychlení:

Maximální zrychlení krokového motoru bylo vypočítáno pomocí vzorců 4.12 až 4.17, které udává výrobce motorů v příslušném manuálu [12]. Pasivní odpory byly ve výpočtu zanedbány.

$$M_{2N} = M_{req} \cdot k \quad k \geq 2 \quad (4.12) \text{ [12, str. 85]}$$

$$M_{req} = M_a + M_L \quad (4.13) \text{ [12, str. 85]}$$

$$M_a = J \cdot \varepsilon \quad (4.14) \text{ [12, str. 85]}$$

$$M_{2N} = J \cdot \varepsilon \cdot k \Rightarrow \varepsilon = \frac{M_{2N}}{J \cdot k} \quad J = J_{RED} \quad (4.15)$$

$$\varepsilon_{\max} = \frac{M_{2N} + M_L}{k \cdot J} = \frac{1,2 + 0}{2 \cdot 1,2 \cdot 10^{-4}} = \underline{\underline{5000 s^{-2}}} \quad (4.16)$$

$$a_{v\max} = r_{řem} \cdot \varepsilon = 0,0175 \cdot 5000 = \underline{\underline{87,5 ms^{-2}}} \quad (4.17)$$

ε_{\max} [s⁻¹] maximální úhlové zrychlení motoru

$a_{v\max}$ [ms⁻¹] maximální zrychlení vozíku

M_{2N} [Nm] Jmenovitý moment motoru při otáčkách 100min⁻¹ [12, str. 46]

M_{req} [Nm] celkový moment zátěže

M_a [Nm] moment dynamické zátěže

M_L [Nm] moment statické zátěže

J [kg·m²] moment setrvačnosti zátěže - moment redukováný na hřídel

k [1] bezpečnost

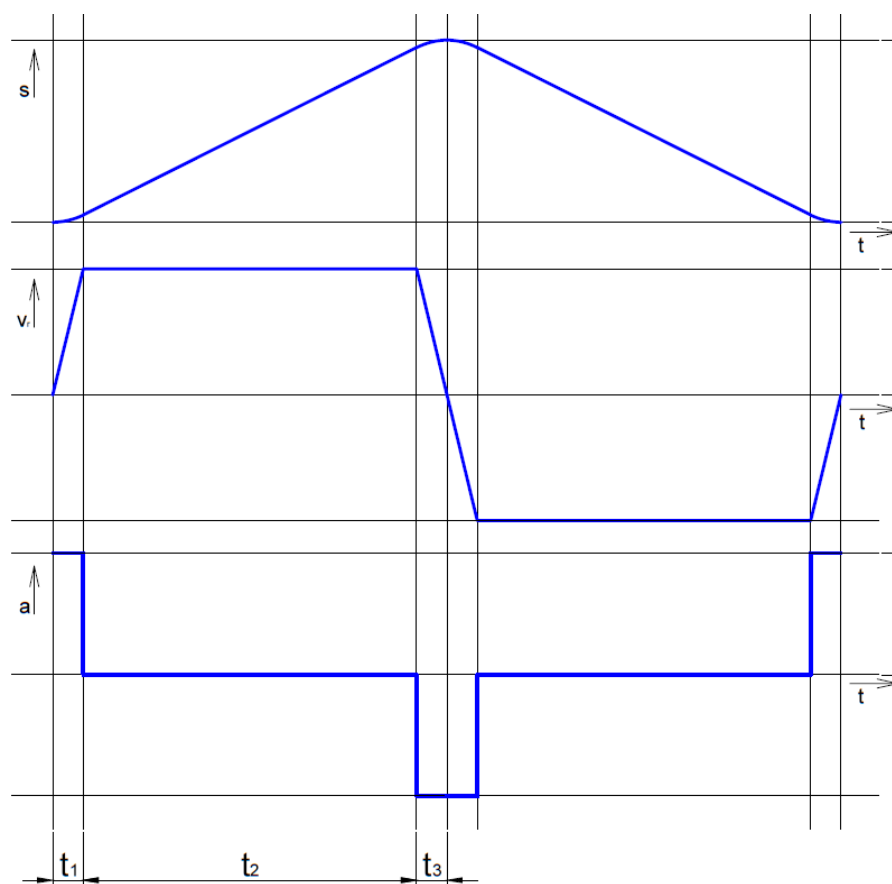
$r_{řem}$ [m] poloměr řemenice

4.3.4 Zdvihová závislost rozváděcího pohybu

Vzhledem k malým rychlostem rozvádění byla pro řízení rozváděcího pohybu zvolena jednoduchá lichoběžníková závislost rychlosti na čase. Na obrázku 4.18 je znázorněna jedna perioda dráhy, rychlosti a zrychlení rozváděcího elementu v závislosti na čase. Pohyb elementu je odvozen od požadované délky rozvádění L , ustálené rychlosti rozvádění v_r a zrychlení v úvratích a .

Příslušné časy potřebné pro řízení krokového motoru jsou vypočteny dle vztahů 4.18 až 4.22. Dle vztahu 4.23 lze vypočítat otáčky motoru pro zvolenou ustálenou rychlost rozvádění.

Hodnoty zadané uživatelem jsou tedy šířka rozvádění, rozváděcí rychlost a zrychlení v úvratích. Maximální zrychlení je dáno jmenovitým momentem motoru a redukovaným momentem setrvačnosti poháněné soustavy, viz kapitola 4.3.3.



obr. 4.18 Kinematika rozváděcího pohybu

4. Návrh vhodného systému navíjení

$$L = \frac{v_r}{2} \cdot t_1 + v_r \cdot t_2 + \frac{v_r}{2} \cdot t_3 \quad (4.18)$$

$$t_1 = t_3 \quad (4.19)$$

$$L = t_2 \cdot v_r + v_r \cdot t_1 \quad (4.20)$$

$$t_1 = \frac{v_r}{a_m} \quad (4.21)$$

$$L = t_2 \cdot v_r + v_r \cdot \frac{v_r}{a_m} \Rightarrow t_2 = \frac{L - \frac{v_r^2}{a_m}}{v_r} \quad (4.22)$$

$$n_r = \frac{30 \cdot v_r}{\pi \cdot r_{rem}} \quad (4.23)$$

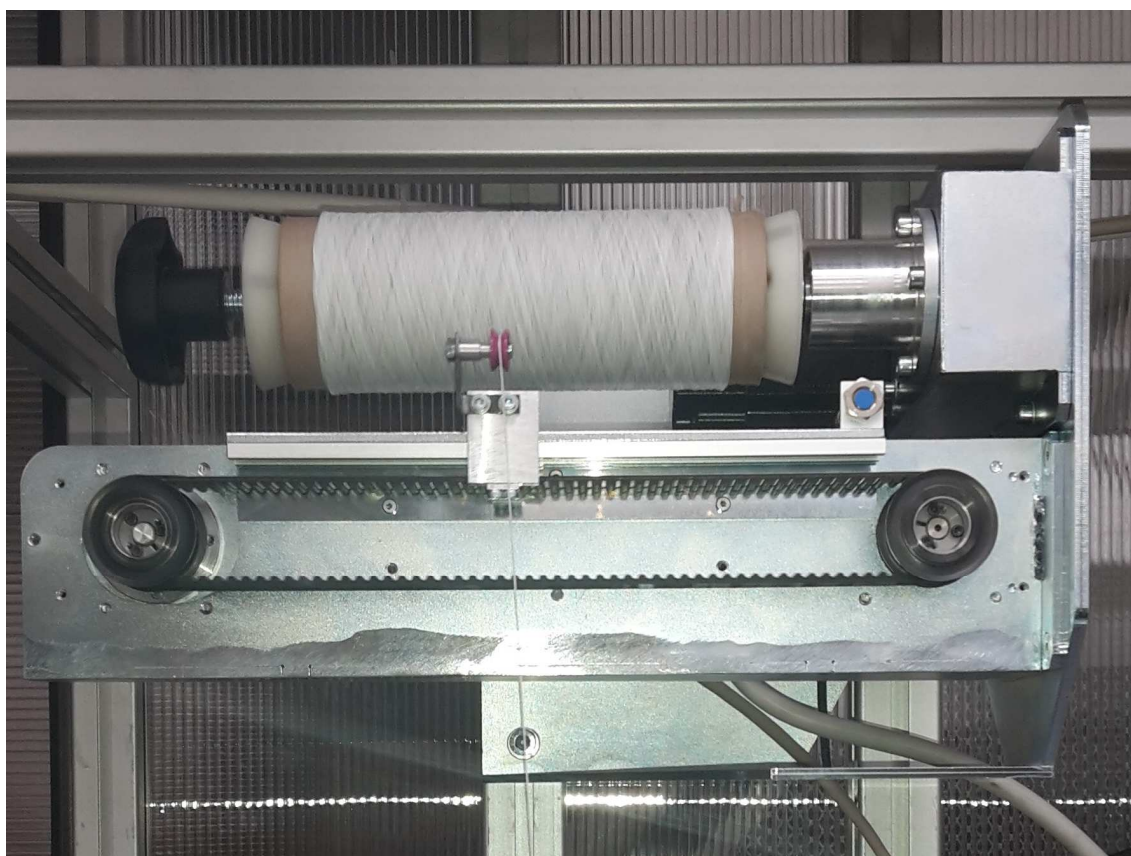
L	[m]	šířka rozvádění
v_r	[m·s ⁻¹]	ustálená rozváděcí rychlost
a_v	[m·s ⁻²]	zrychlení vozíku
t_1	[s]	čas rozběhu rozváděcího pohybu
t_2	[s]	čas ustálené rozváděcí rychlosti
t_3	[s]	čas doběhu rozváděcího pohybu
n_r	[min ⁻¹]	otáčky motoru při ustálené rychlosti
r_{rem}	[m]	poloměr řemenice

5 Ověření navíjecího systému

Navržený navíjecí mechanismus byl na základě výkresové dokumentace vyroben a následně otestován na stroji při procesu výroby nanopříze. Testování ukázalo, že navržený systém je funkční, vytváří křížový návin a bylo ověřeno, že ke spadávání příze z kladičky během rozvádění nedochází.

Na cívce během navíjení dochází k hromadění příze na krajích návinu. Je to způsobeno především díky nenulové vzdálenosti rozváděcího bodu od povrchu cívky a v důsledku zpomalování rozváděcího elementu v úvratích. Pro současný případ navíjení malých návinů pro laboratorní vzorky nepřináší tento jev podstatná negativa. V případě pozdější potřeby navíjení velkoobjemových návinů je možné tento efekt jednoduše eliminovat takzvaným rozmazáváním krajů, kdy dochází k periodickému prodlužování délky rozvádění. Toho je možné docílit vhodným řízením krokového motoru.

Na obrázku 4.18 je fotografie finálního vyrobeného navíjecího mechanismu, zachycená při procesu navíjení vyráběné nanovláknenné příze.



obr. 4.18 Vyrobené navíjecí ústrojí

6 Analýza a optimalizace zvlákňovací elektrody

Tato kapitola se věnuje analýze zvlákňovací elektrody a optimalizaci jejího tvaru. Zvlákňovací elektroda je nejdůležitější částí technologie výroby nanovláken metodou zvlákňování účinkem střídavého proudu. Zásadní vliv na výrobnost elektrody a jemnost výsledných vláken má intenzita elektrického pole. Zpravidla platí, že čím větší je intenzita, tím se zvětšuje výrobnost, ale zároveň dochází ke snižování jemnosti výsledných vláken. [9, kap. 3.3]

Stávající elektroda byla podrobena několika analýzám rozložení elektrostatického pole a byl sledován vliv různých parametrů na výslednou intenzitu elektrického pole.

Dále byl navržen nový tvar zvlákňovací elektrody, který byl optimalizován z hlediska rozložení intenzity elektrického pole.

Závěr kapitoly se věnuje testování a měření elektrod při procesu zvlákňování a porovnání výsledků měření.

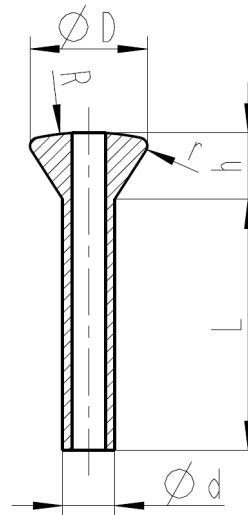
6.1 Analýza stávající elektrody

Na obrázku 6.1 je fotografie stávající elektrody používané pro zvlákňování. Hlava elektrody, která je její nejpodstatnější částí, připomíná tvar kužele, od toho je tedy nazývána „Kuželová elektroda“. Zvlákňovaný polymer proudí odspoda vnitřkem elektrody až na její povrch a dochází k přeplavování hlavy elektrody. Nezvlákněný polymer stéká vnějškem trubičky do sběrné nádoby.

Na obrázku 6.2 jsou vyznačeny konstrukční rozměry Kuželové elektrody, z nichž některé byly ve výpočtovém modelu měněny a pomocí výpočtového programu bylo analyzováno, jaký mají vliv na velikost intenzity elektrického pole.



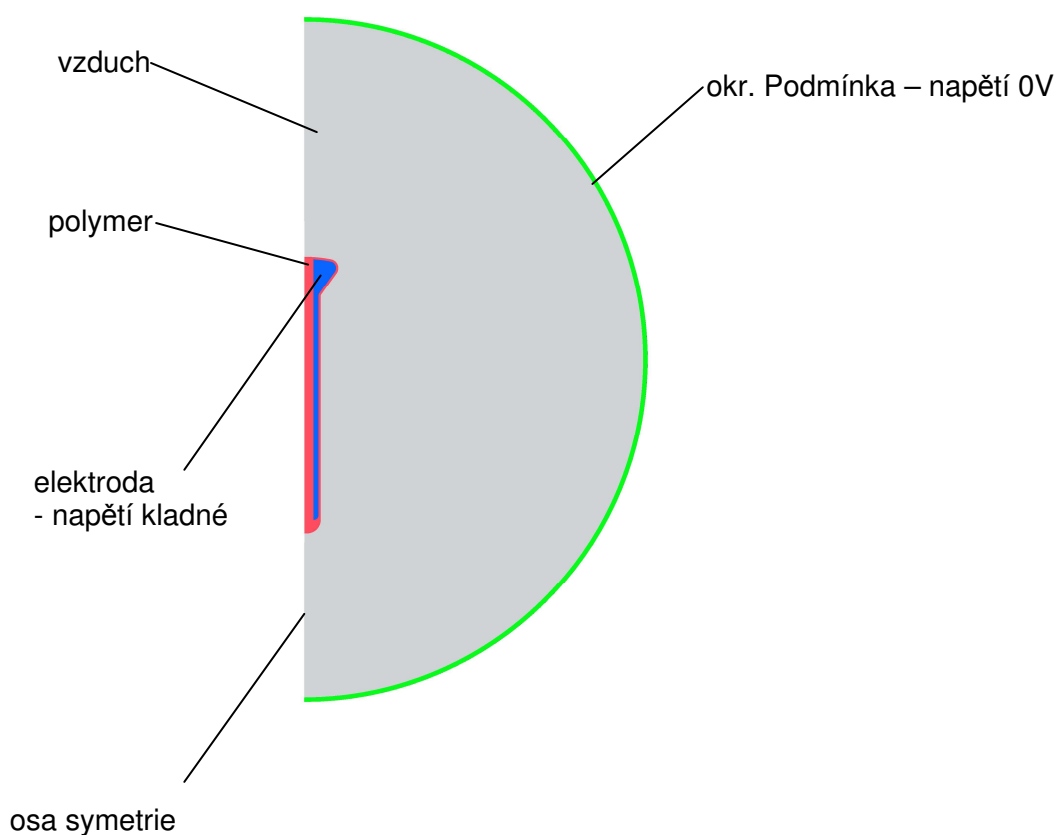
obr. 6.1 Stávající elektroda



obr. 6.2 Rozměry elektrody

6.1.1 Výpočtový model

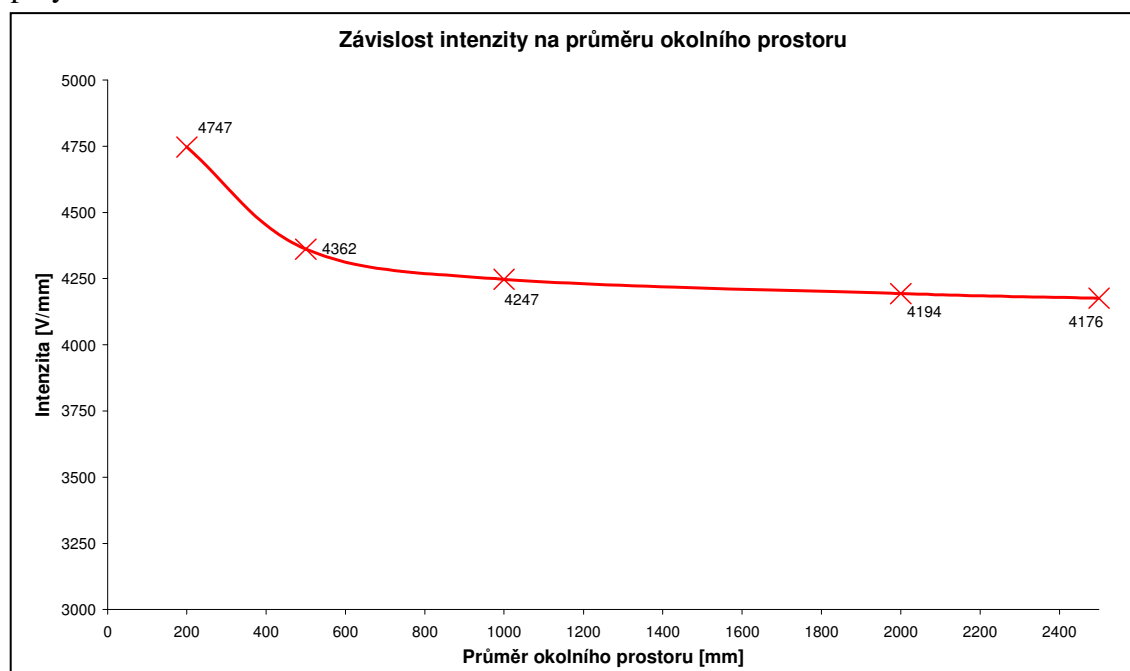
Rozložení intenzity elektrického pole bylo analyzováno pomocí metody konečných prvků v softwaru Autodesk Simulation Mechanical v modulu, který slouží pro výpočty elektrického pole. Na obrázku 6.3 je znázorněn výpočtový model, který byl pro všechny analýzy použit. Protože je elektroda rotačně symetrické těleso, byla úloha postavena jako osově symetrická. Způsob výroby nanovláken na stroji je založen na principu zvlákňování účinkem střídavého proudu, kdy druhou elektrodu tvoří okolní ionizovaný vzduch (kap. 3.1.5). Nejlépe se tomuto stavu přibližuje okolní prostor ve tvaru koule, proto tedy byla okrajová podmínka vytvořena jako hranice koule o určitém průměru. Na tuto hranici byla zadána hodnota nulového napětí. Na samotnou elektrodu bylo zadáno kladné napětí o určité hodnotě, nejčastěji 25 kV. Pro správně postavenou úlohu jsou také důležité hodnoty relativní permitivity jednotlivých těles výpočtového modelu. U kovových vodivých materiálů je hodnota relativní permitivity teoreticky nekonečná, což do modelu zadat nelze, proto byla zadána vysoká hodnota, a to 10^9 . Relativní permitivita vzduchu nabývá hodnoty 1 a pro polymer byla na základě tabulkových hodnot zadána hodnota 20.



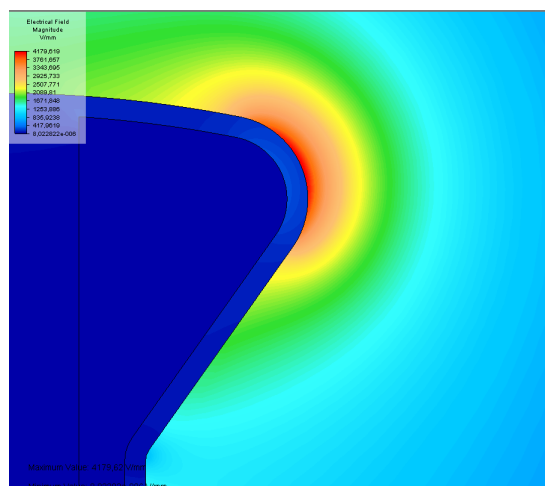
obr. 6.3 Výpočtový model

6. Analýza a optimalizace zvlákňovací elektrody

Nejprve byla provedena analýza, která sledovala vliv průměru kulového prostoru na maximální intenzitu na elektrodě. Z grafu 6.1 je patrné, že od průměru 1000 milimetrů nemá již změna průměru prostoru veliký vliv na velikost intenzity elektrického pole. Skutečný prostor, ve kterém dochází ke zvlákňování, je velký minimálně dva a půl metru. Lze tedy říci, že vliv zvlákňovacího prostoru na chování intenzity elektrického pole bude zanedbatelný. Ve výpočtovém modelu je tedy použit průměr koule 2500 milimetrů. Na obrázku 6.4 je znázorněn výsledek analýzy rozložení elektrického pole pro základní tvar elektrody a průměr kulového prostoru 2500 milimetrů. V místech s největší intenzitou byly hodnoty sledovány ve všech analýzách. Zejména v tomto místě dochází ke zvlákňování. Hodnot, které jsou znázorněny v grafu, bylo dosaženo zprůměrováním pěti nejvyšších hodnot intenzity na sousedních uzlech na povrchu elektrody, respektive polymeru.



graf. 6.1 Závislost intenzity na průměru kulového prostoru



obr. 6.4 rozložení intenzity elektrického pole a kuželové elektrodě

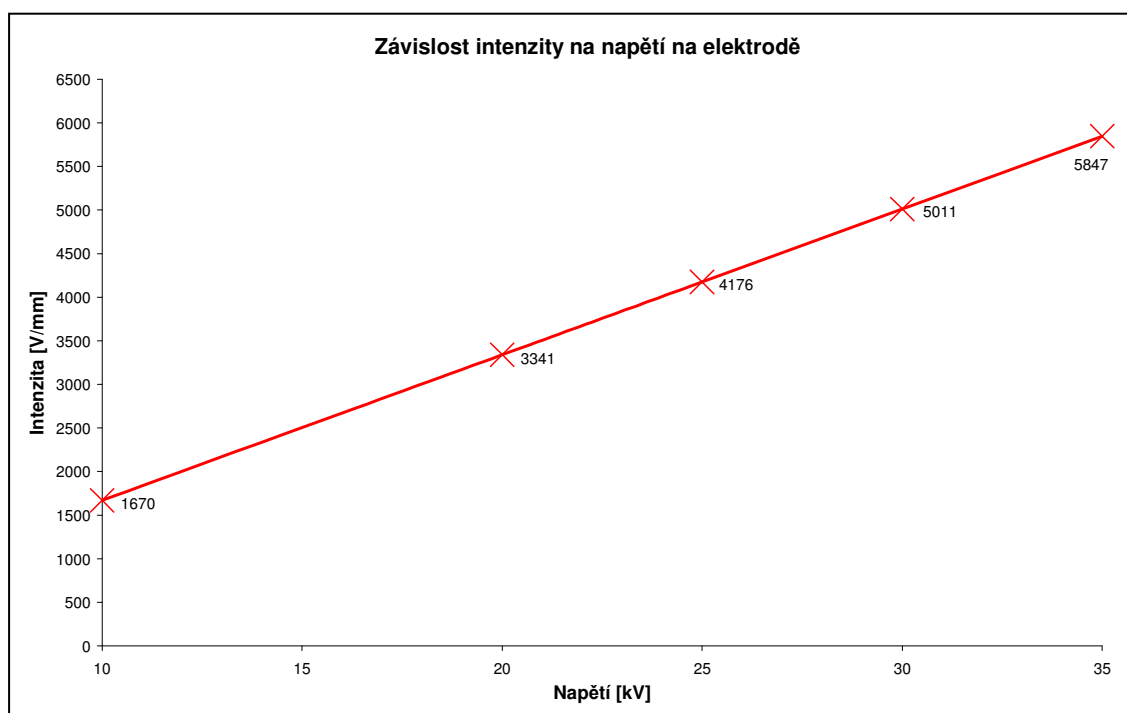
6.1.2 Analýzy rozložení intenzity elektrického pole

Na modelu stávající elektrody bylo provedeno několik analýz, které slouží pro pochopení chování elektrického pole na základě změny určitých parametrů elektrody či okrajových podmínek. Tyto charakteristiky byly důležitým vodítkem pro následnou optimalizaci tvaru elektrody. Díky těmto závislostem bylo možné do jisté míry predikovat chování elektrického pole při různě nastavených konstrukčních parametrech. Pro každou provedenou analýzu byly vždy použité konstrukční parametry uvedeny v tabulce nad příslušným grafem a odpovídají rozměrům vyznačeným v obrázku 6.2 na stránce 42.

Graf 6.2 znázorňuje závislost intenzity elektrického pole na elektrickém napětí elektrody. Z grafu je patrné, že s rostoucím napětím intenzita lineárně roste. Proto je možné zjišťovat hodnoty intenzity pro různá napětí při stejném konstrukčním uspořádání bez pomoci metody konečných prvků. Je nutné znát pouze hodnotu intenzity pro jednu hodnotu napětí na elektrodě a pomocí principu přímé úměry lze dopočítat intenzitu pro jakékoliv napětí. Parametry výpočtu jsou v tabulce 6.1.

tab. 6.1 Parametry pro analýzu závislosti intenzity na napětí

průměr D [mm]	14	napětí [V]	proměnné
poloměr r [mm]	1.5	délka tyče L [mm]	50
poloměr R [mm]	30	výška hlavy h [mm]	8



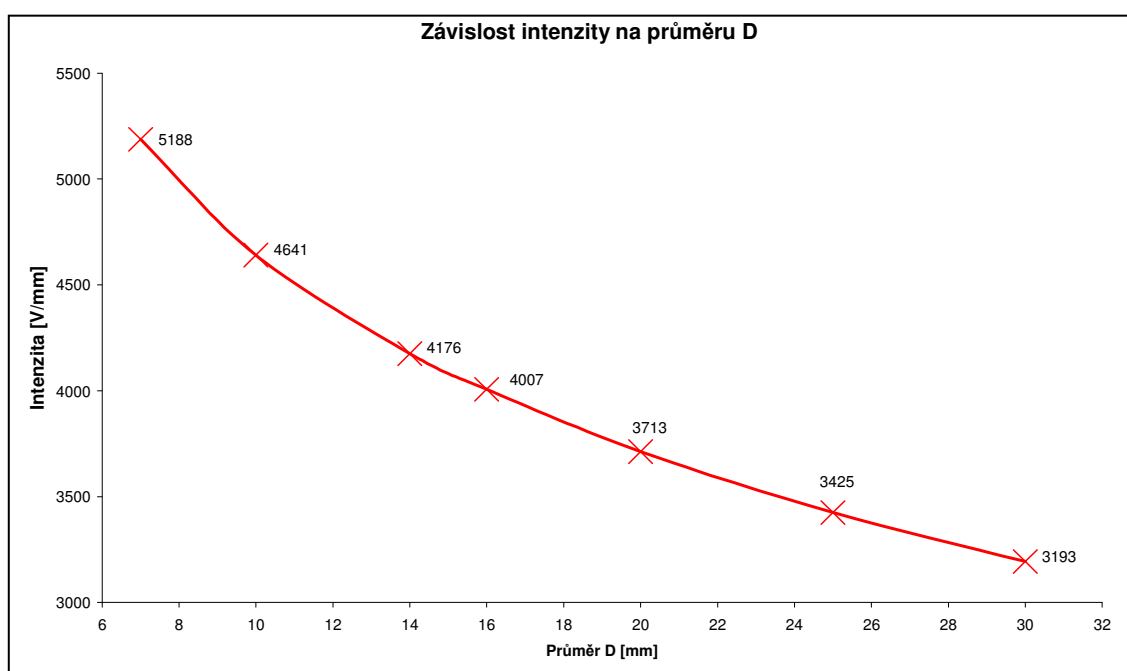
graf. 6.2 Závislost intenzity na napětí elektrody

6. Analýza a optimalizace zvlákňovací elektrody

Graf 6.3 ukazuje závislost intenzity elektrického pole na velikosti průměru hlavy elektrody. Je patrné, že intenzita s rostoucím průměrem nelineárně klesá. Je to způsobeno tím, že vlivem zvyšování průměru dochází ke zmenšování součtové křivosti na okraji elektrody. Intenzita elektrického pole je funkcí křivosti a se zvyšující se křivostí intenzita nelineárně narůstá. Parametry modelu v tabulce 6.2. Pro připomenutí jsou rozměry znázorněny na obrázku 6.5

tab. 6.2 Parametry pro analýzu závislosti intenzity na průměru D

průměr D [mm]	proměnný	napětí [V]	25000
poloměr r [mm]	1.5	délka tyče L [mm]	50
poloměr R [mm]	30	výška hlavy h [mm]	8

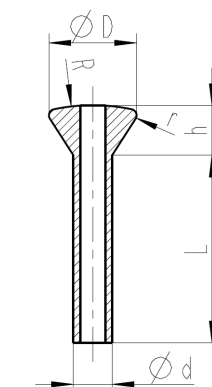


graf 6.3 Závislost intenzity na průměru D

Dále byla provedena analýza vlivu poloměru zaoblení okraje hlavy elektrody r , jejíž výsledek je znázorněn v grafu 6.4, str. 47. Z grafu vyplývá, že s rostoucím poloměrem zaoblení intenzita elektrického pole klesá. Je to opět dáno zmenšující se součtovou křivostí na okraji elektrody. Parametry modelu popsány v tabulce 6.3.

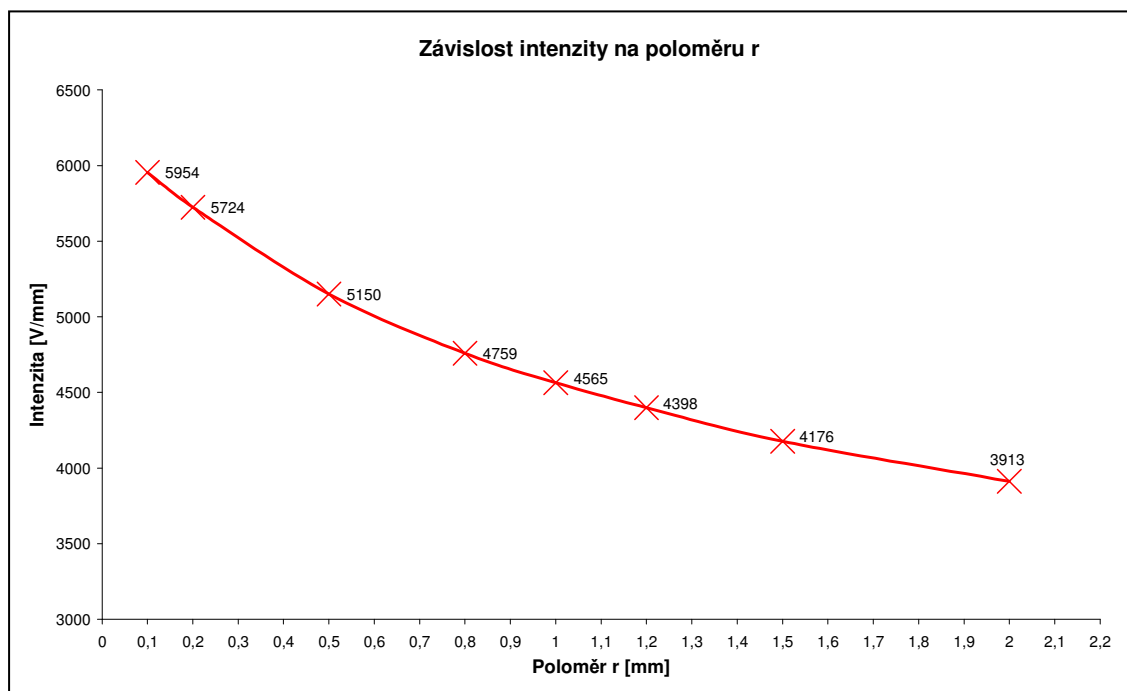
tab. 6.3 Parametry pro analýzu závislosti intenzity na poloměru r

průměr D [mm]	14	napětí [V]	25000
poloměr r [mm]	proměnný	délka tyče L [mm]	50
poloměr R [mm]	30	výška hlavy h [mm]	8



obr. 6.5 rozměry elektrody

6. Analýza a optimalizace zvlákňovací elektrody

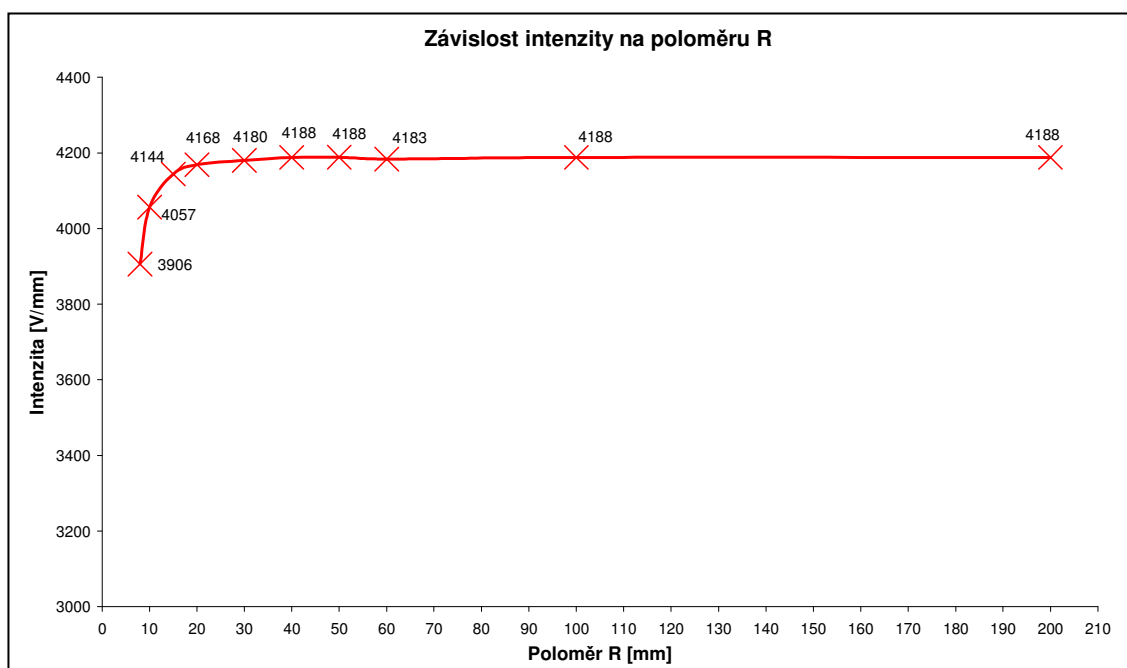


graf 6.4 Závislost intenzity na poloměru r

V grafu 6.5 je zobrazena závislost intenzity na poloměru vršku hlavy elektrody. Z grafu vyplývá zajímavá skutečnost, že od poloměru o velikosti 30 milimetrů již nemá zvětšování poloměru na změnu intenzity prakticky žádný vliv. Důležitý poznatek také je, že menší poloměry než 30 milimetrů intenzitu výrazně zmenšují. Parametry modelu v tabulce 6.4

tab. 6.4 Parametry pro analýzu závislosti intenzity na poloměru R

průměr D [mm]	14	napětí [V]	25000
poloměr r [mm]	1,5	délka tyče L [mm]	50
poloměr R [mm]	proměnný	výška hlavy h [mm]	8



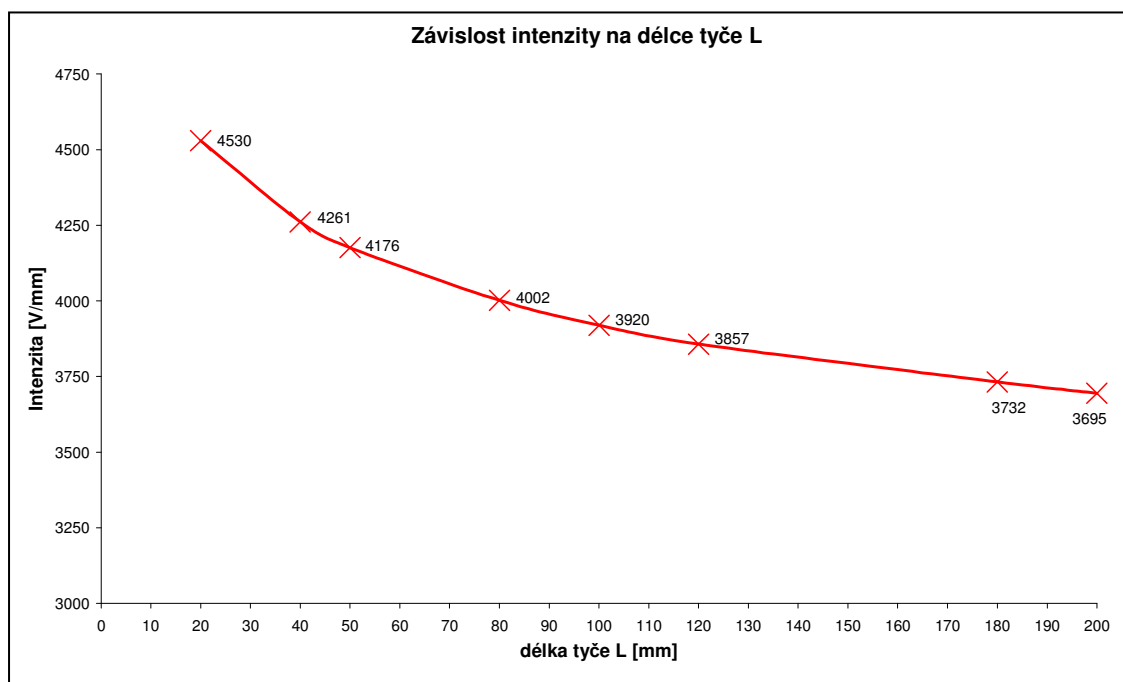
graf 6.5 Závislost intenzity na poloměru R

6. Analýza a optimalizace zvlákňovací elektrody

Přestože nejdůležitější částí elektrody, kde dochází k největšímu zvlákňování, je její hlava, bylo také důležité zjistit, jaký vliv má na velikost intenzity délka trubičky. Z grafu 6.6 je patrné, že s prodlužováním trubičky dochází ke snižování intenzity na hlavě elektrody.

tab. 6.5 Parametry pro analýzu závislosti intenzity na délce tyče L

průměr D [mm]	14	napětí [V]	25000
poloměr r [mm]	1.5	délka tyče L [mm]	proměnná
poloměr R [mm]	30	výška hlavy h [mm]	8



graf 6.6 Závislost intenzity na délce tyče L

Ze všech zmíněných analýz stávající zvlákňovací elektrody lze usoudit, jakým způsobem je možné zvýšit intenzitu elektrického pole a zvýšit tím výrobnost elektrody. Zvyšování výrobnosti elektrody prostřednictvím zvyšování intenzity elektrického pole s sebou však přináší nežádoucí efekt v podobě změny jemnosti výsledných nanovláken. Se zvyšující se intenzitou klesá jemnost výsledných nanovláken. [9].

Také bylo u přeplavovací elektrody pozorováno, že v případech, kdy byla křivost na elektrodě a potažmo intenzita velmi vysoká, pozorováno, že již dochází k vytrhávání proudů nezvlákněného polymeru, což je nežádoucí.

Vzhledem k požadavku zachování stejné jemnosti vláken byl pro zvýšení produktivity elektrody zvolen vhodnější přístup, jemuž se věnuje následující kapitola.

6.2 Návrh a optimalizace nového tvaru elektrody

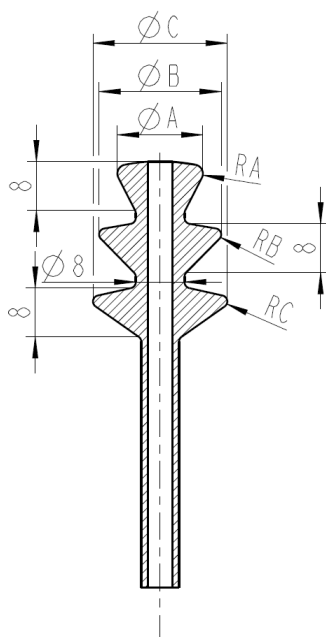
Tato kapitola se věnuje optimalizaci nově navrženého tvaru elektrody z pohledu optimálního rozložení intenzity elektrického pole. Na obrázku 6.6 je znázorněn tvar nově navržené elektrody a jsou zde popsány důležité rozměry. Z obrázku je patrné, že elektroda byla navržena jako třístupňová. První stupeň má shodné rozměry jako elektroda stávající, další dva stupně jsou v některých rozměrech odlišné. Nová elektroda svým tvarem připomíná strom, proto jí byl dán pracovní název „Stromečková elektroda“, jenž bude dále v práci používán.

Navržená elektroda by měla nabízet větší produktivitu zvlákňování, neboť oproti stávající elektrodě dochází k nejintenzivnějšímu zvlákňování na třech přelapovacích místech elektrody. Teoreticky by tedy měla být výrobnost vláken třikrát větší. Aby byla výsledná jemnost vláken ve všech třech místech stejná, je nutné, aby na těchto místech byla srovnatelně velká hodnota intenzity elektrického pole. Za srovnatelné hodnoty byly považovány hodnoty s odchylkou do 100 V/mm.

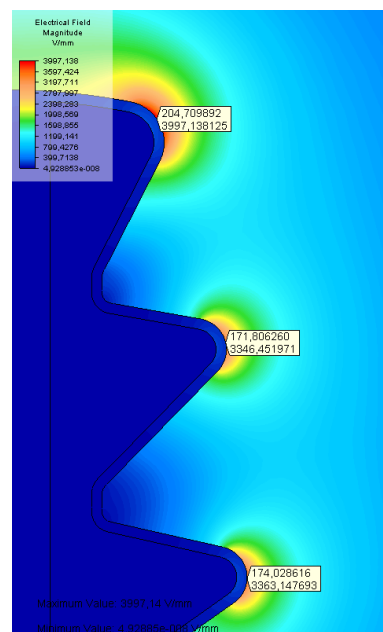
Na obrázku 6.7 je zobrazen prvotní výpočet Stromečkové elektrody o rozměrech dle tabulky 6.6.

tab. 6.6 Parametry pro prvotní analýzu stromečkové elektrody

průměr A [mm]	14	RA [mm]	1,5
průměr B [mm]	20	RB [mm]	1
průměr C [mm]	22	RC [mm]	1
napětí [V]	30000		



obr. 6.6 tvar stromečkové elektrody



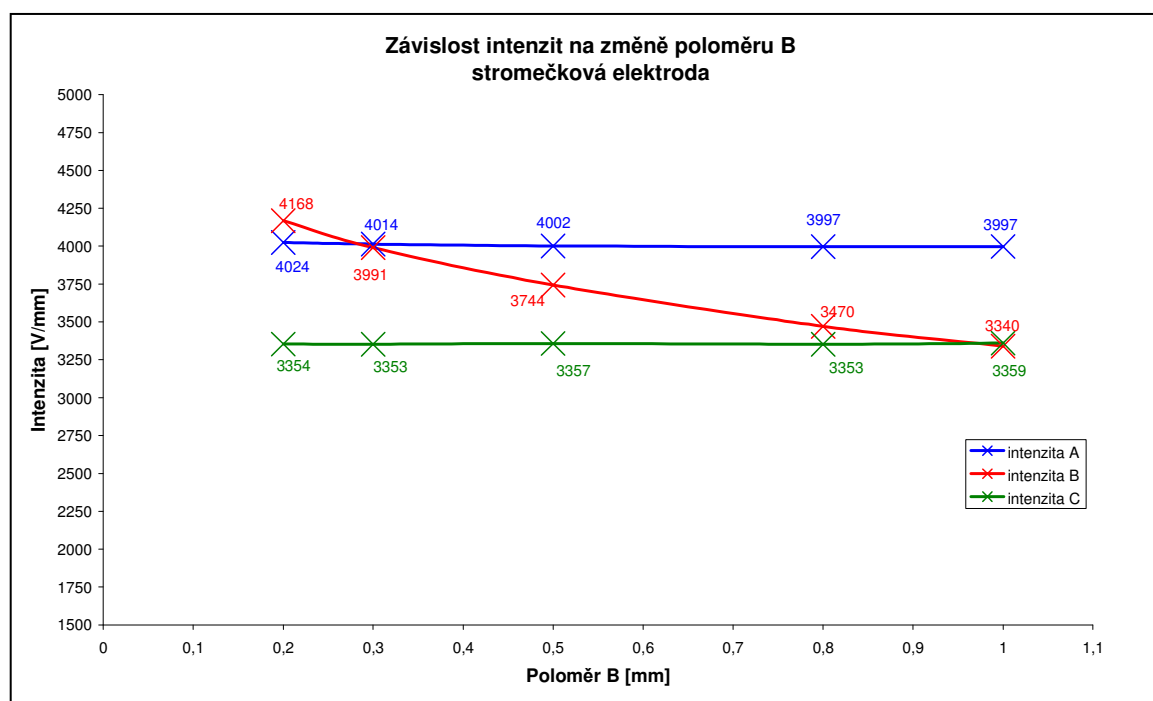
obr. 6.7 Prvotní analýza

6. Analýza a optimalizace zvlákňovací elektrody

Z obrázku 6.7 vyplývá, že intenzita na elektrodě o těchto rozměrech není optimálně rozdělena na všechna tři zvlákňovací místa. Proto byla elektroda podrobena optimalizaci, kdy byly měněny velikosti poloměrů zaoblení *B* a *C*. Nejprve byla sledována velikost intenzity na všech třech místech v závislosti na změně poloměru *B*. Výsledné závislosti jsou zobrazeny v grafu 6.7. V tabulce 6.7 jsou uvedeny jednotlivé rozměry elektrody.

tab. 6.7 Parametry pro analýzu vlivu poloměru *B*

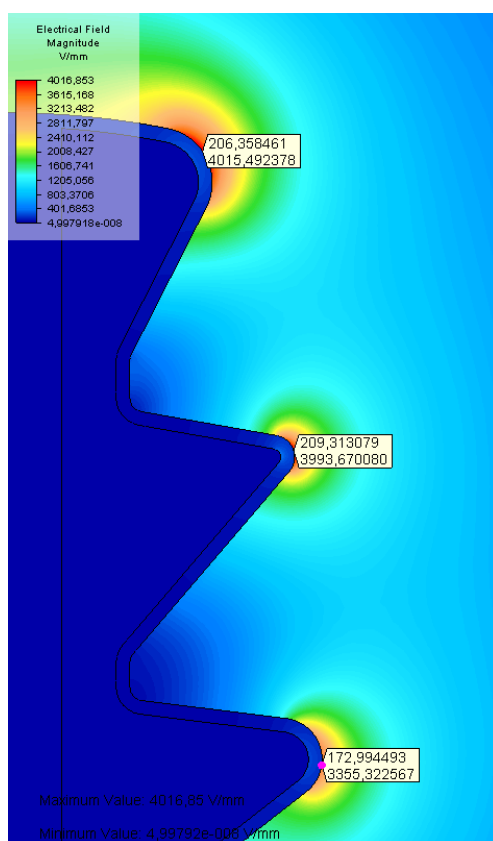
průměr A [mm]	14	RA [mm]	1,5
průměr B [mm]	20	RB [mm]	proměnný
průměr C [mm]	22	RC [mm]	1
napětí [V]	30000		



graf. 6.7 Závislost intenzit na změně poloměru *B*

Z grafu je patrné, že ve zkoumaném rozsahu poloměru *B*, má jeho velikost velmi malý vliv na změnu intenzity v místech *A* a *C*. Podstatné však je, že intenzita v místě *B* se v závislosti na velikosti poloměru *B* mění a lze nalézt průsečík závislostí intenzit v místech *A* a *B*. Z toho je patrné, že při této kombinaci rozměrů bude v místech *A* a *B* srovnatelná intenzita. Na obrázku 6.8 je zobrazen výsledek analýzy, kdy byla za poloměr *B* zvolena právě hodnota, která odpovídá průsečíku závislostí. Konkrétně je to hodnota 0,3 milimetru. Z obrázku 6.8 je patrné, že intenzity v místech *A* a *B* jsou skutečně srovnatelné. V tabulce 6.8 jsou rozměry elektrody blíže popsány.

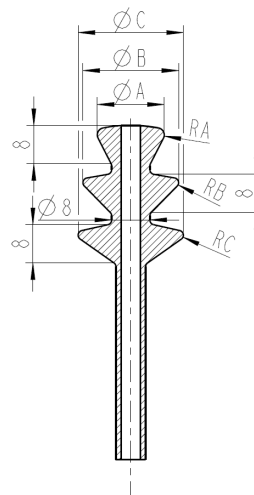
6. Analýza a optimalizace zvlákňovací elektrody



obr. 6.8 rozložení intenzity při optimalizovaném poloměru B

tab. 6.8 Rozměry elektrody při optimalizovaném poloměru B

průměr A [mm]	14
průměr B [mm]	20
průměr C [mm]	22
RA [mm]	1,5
RB [mm]	0,3
RC [mm]	1
napětí [V]	30000



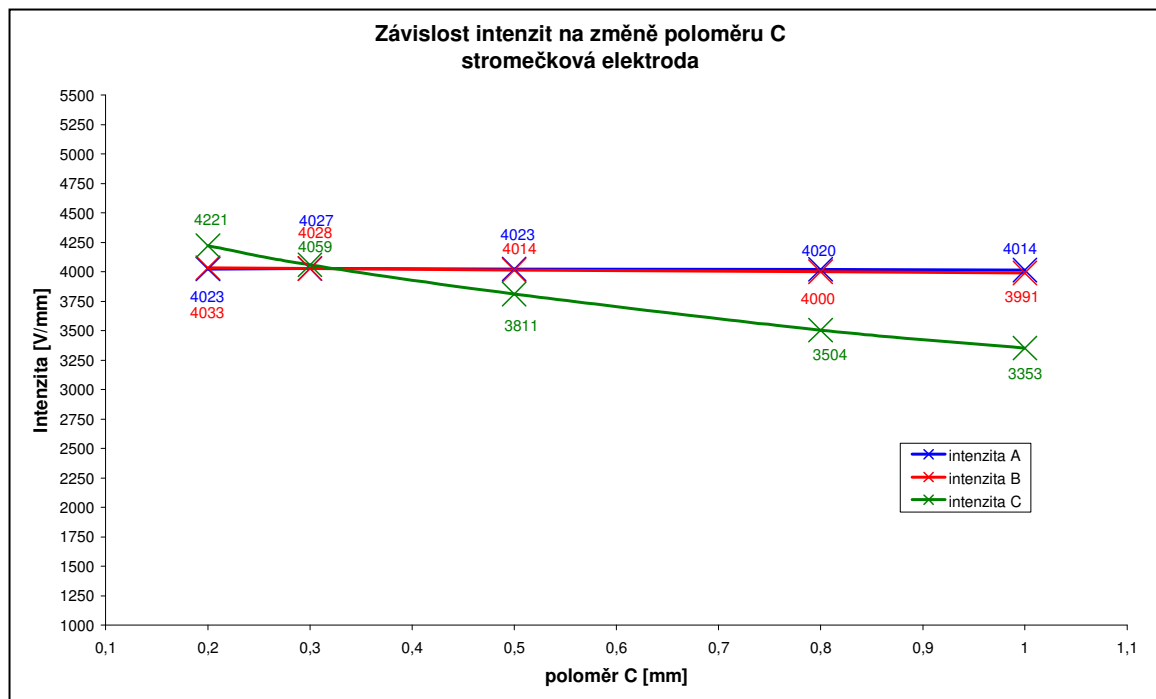
Takto částečně optimalizovaný tvar elektrody byl podroben další fázi optimalizace, kdy poloměr B byl zvolen na hodnotu, která vyšla z předchozí optimalizace, tedy 0,3 milimetru a poloměr C byl měněn. Graf 6.8 na stránce 48 znázorňuje výslednou závislost rozložení intenzity na změně poloměru C . Z grafu je patrné, že hodnoty intenzit v místě A a B se ve zkoumaném rozsahu prakticky neměnily a zůstávaly na srovnatelné úrovni s hodnotami z předchozí analýzy. Dále z grafu vyplývá, že lze opět nalézt průsečík závislostí intenzit, což odpovídá srovnatelné hodnotě intenzity ve všech třech místech. Při volbě velikosti poloměru C , která odpovídá nalezenému průsečíku, tedy na Stromečkové elektrodě dojde k optimalizaci rozložení intenzity elektrického pole.

Lze tedy říci, že byl nalezen optimální tvar elektrody a to takový, že na všech třech místech, kde dochází k nejintenzivnějšímu zvlákňování, je srovnatelná intenzita elektrického pole. V těchto místech by tedy mělo docházet k produkci nanovláken o srovnatelné jemnosti.

tab. 6.9 Parametry pro analýzu vlivu poloměru C

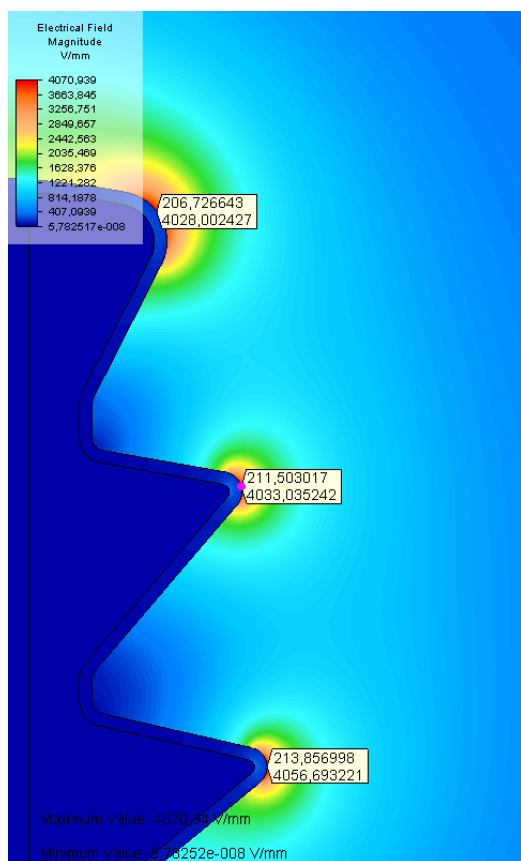
průměr A [mm]	14	RA [mm]	1,5
průměr B [mm]	20	RB [mm]	0,3
průměr C [mm]	22	RC [mm]	proměnný
napětí [V]	30000		

6. Analýza a optimalizace zvlákňovací elektrody



graf. 6.8 Závislost intenzit na změně poloměru C

Na obrázku 6.9 je zobrazeno rozložení intenzity elektrického pole na optimalizované Stromečkové elektrodě. Z obrázku je patrné, že hodnoty intenzit jsou srovnatelné. Takto optimalizovaná elektroda byla vyrobena a podrobena testování, kterému se věnuje následující kapitola. Na obrázku 6.10 je fotografie vyrobené elektrody.



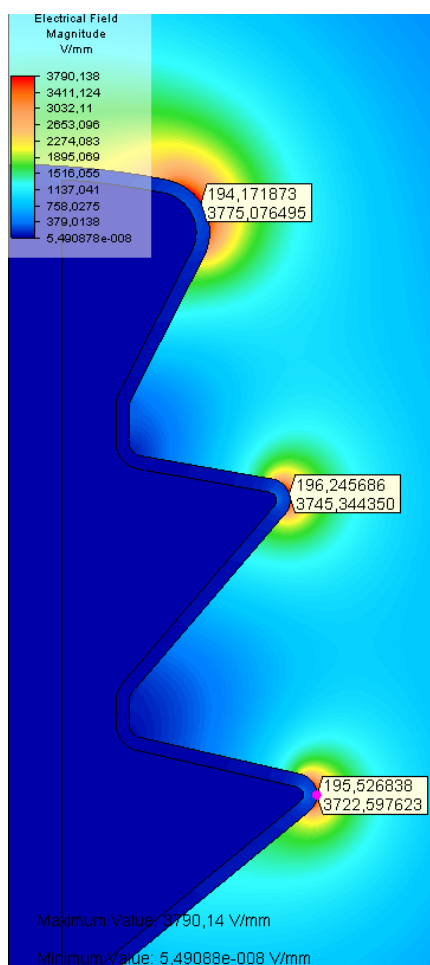
obr. 6.9 rozložení intenzity na optimalizované elektrodě



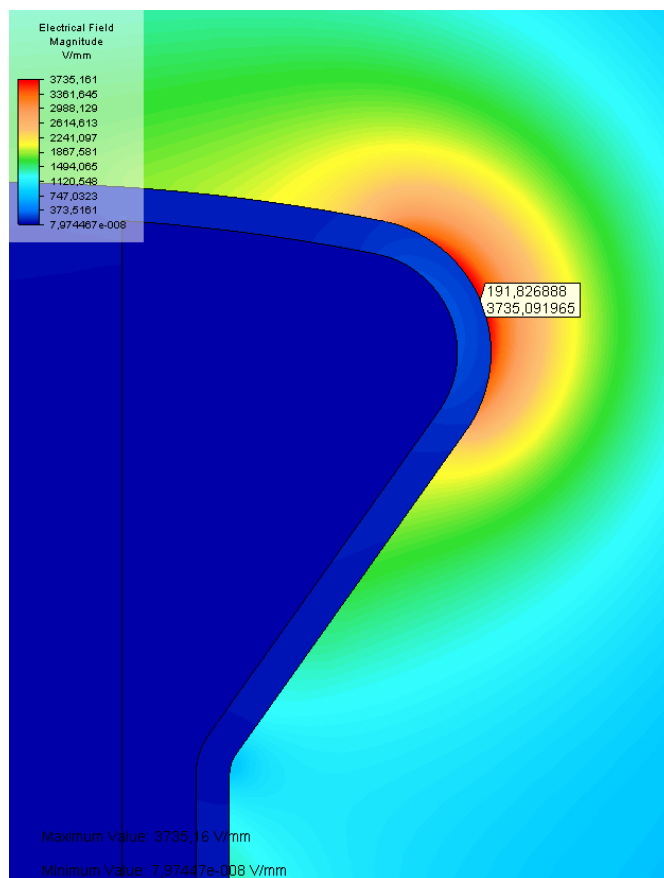
obr. 6.10 Stromečková elektroda

6. Analýza a optimalizace zvlákňovací elektrody

Vzhledem k podmínkám měření produktivity při zvlákňování, o kterém pojednává následující kapitola, byla provedena další analýza intenzity elektrického pole pro elektrody s trubičkou 200 mm. Byly určeny hodnoty napětí, pro která jsou hodnoty intenzity na Stromečkové a Kuželové elektrodě srovnatelné. Pro Kuželovou elektrodu vyšla hodnota napětí 25 kV a pro Stromečkovou 30 kV. Při těchto napětích tedy bylo zvlákňování provedeno. Na obrázku 6.11 je znázorněno rozložení intenzity na Stromečkové elektrodě při trubičce při dané délce a daném napětí. Je patrné, že hodnoty intenzity na jednotlivých zvlákňovacích místech jsou stále srovnatelné, s odchylkou do sto voltů na milimetr. Na obrázku 6.12 je znázorněno rozložení intenzity na elektrodě Kuželové, z čehož je patrné, že velikost intenzity v místě zvlákňování je srovnatelná se Stromečkovou elektrodou. Obě elektrody by tedy při daných napětích měly vyrábět vlákna o srovnatelné jemnosti, Stromečková elektroda by však měla mít větší výrobnost.



obr. 6.11 rozložení intenzity na optimalizované stromečkové elektrodě, napětí 30kV, délka trubičky 200 mm



obr. 6.12 rozložení intenzity na stávající kuželové elektrodě, napětí 25kV, délka trubičky 200 mm

6.3 Měření na elektrodách při zvlákňovacím procesu

Na závěr bylo provedeno několik měření na samotném stroji při procesu zvlákňování účinkem střídavého elektrického proudu. Byla provedena měření jak na původní Kuželové elektrodě tak na nové elektrodě Stromečkové.

6.3.1 Kritická napětí

Nejprve byly při zvlákňovacím procesu zjišťovány hodnoty některých kritických napětí a to napětí startovací, napětí optimální a napětí minimální. Startovací napětí je hodnota, při které započne na elektrodě zvlákňovací proces. Toto napětí, což je zajímavé, je vždy vyšší než napětí, při kterém elektroda poté dokáže dále zvlákňovat. Lze to tedy chápat tak, že je nutné nejprve překonat určitou kritickou fyzikální mez napětí a poté je možné napětí snížit a zvlákňovat při nižší hodnotě. Tento jev lze přirovnat například ke statickému tření, které je vždy vyšší, než tření dynamické

Za napětí optimální se považuje takové, kdy dochází ke zvlákňování pouze z hlavy elektrody. Při vyšších napětích dochází již také ke zvlákňování z trubičky elektrody.

Napětí minimální je hodnota, kdy zvlákňovací proces ustává a pro případné pokračování procesu zvlákňování je opět nutné překonat napětí startovací.

Všechny uvedené hodnoty byly měřeny pozorováním, sadou deseti měření. Kritická napětí elektrody kuželové jsou uvedeny v tabulce 6.10 a kritická napětí na elektrodě Stromečkové v tabulce 6.11. V grafu 6.9 je znázorněno srovnání jednotlivých napětí.

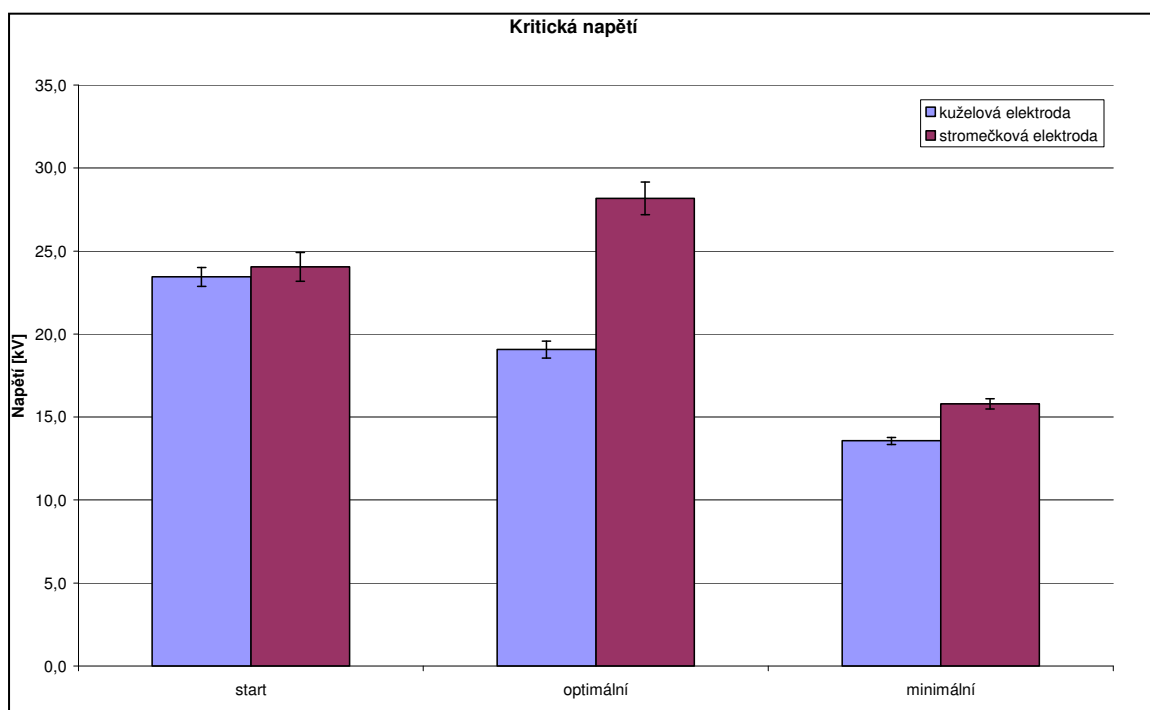
tab. 6.10 Kritická napětí, kuželová elektroda

číslo měření	start [kV]	optimální [kV]	minimální [kV]
1	24,3	19,0	13,7
2	22,9	18,6	13,8
3	23,2	19,4	13,4
4	24,2	18,8	13,7
5	24,0	19,2	13,6
6	22,9	18,5	13,0
7	23,8	19,3	13,6
8	22,5	18,5	13,5
9	23,4	19,0	13,7
10	23,2	20,3	13,6
průměr	23,4	19,1	13,6
směrodatná odchylka	0,58	0,51	0,22

6. Analýza a optimalizace zvlákňovací elektrody

tab. 6.11 Kritická napětí, stromečková elektroda

číslo měření	start [kV]	optimální [kV]	minimální [kV]
1	23,9	28,8	15,5
2	25,8	26,8	16,1
3	22,5	28,3	15,5
4	25,2	27,5	15,9
5	24,2	27,4	16,3
6	24,2	26,9	15,8
7	23,8	27,9	15,2
8	23,7	29,8	15,9
9	23,6	28,9	15,9
10	23,5	29,4	15,9
průměr	24,0	28,2	15,8
směrodatná odchylka	0,87	0,99	0,30



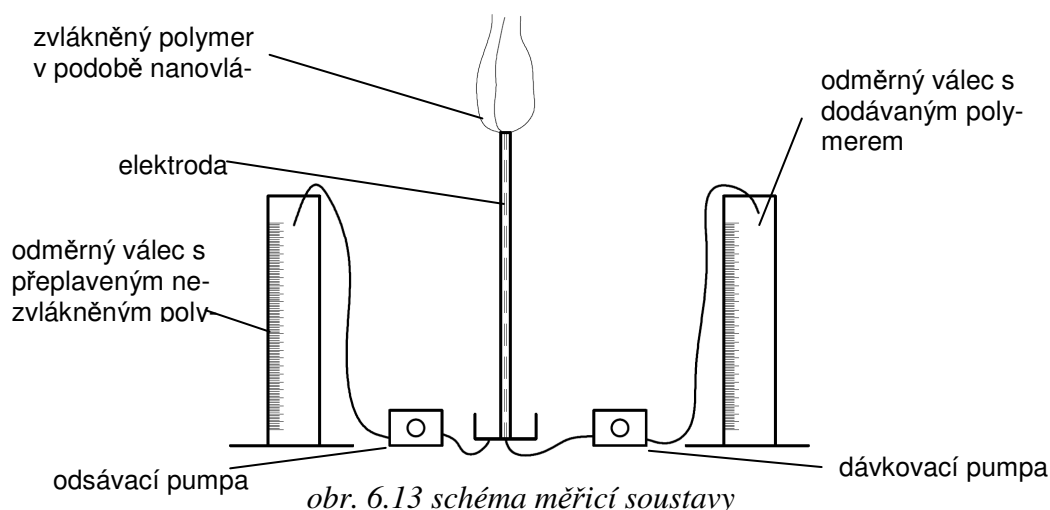
graf 6.9 porovnání kritických napětí

6.3.2 Měření produktivity elektrod

Dále bylo provedeno měření produktivity obou zvlákňovacích elektrod za účelem zjištění, jaký má nově navržená Stromečková elektroda přínos ke zvýšení produktivity vzhledem k elektrodě kuželové. Na obrázku 6.13 je znázorněno zjednodušené schéma měřicí soustavy. Odměrné válce byly naplněny roztokem polymeru a byly odečteny hodnoty objemů před zvlákňováním. Poté byl proces zvlákňování spuštěn při napětích, která odpovídají hodnotám intenzit zjištěných analýzou, o níž pojednává závěr kapitoly 6.2. Po celou dobu zvlákňování byl stopkami měřen čas. Po dokončení zvlákňování byly opět odečteny objemy v odměrných válcích. Toto měření bylo provedeno zvlášť pro každou elektrodu, vždy se stejným typem roztoku polymeru a stejným průto-

6. Analýza a optimalizace zvlákňovací elektrody

kem nastaveným na dávkovací pumpě. Pro zvlákňování byl použit desetiprocentní roztok polyvinylbutyralu v ethanolu.



obr. 6.13 schéma měřicí soustavy

V tabulce 6.12 jsou všechny naměřené a vypočtené hodnoty, vyplývající z měření produktivity obou elektrod. Z tabulky je patrné, že Stromečková elektroda nabízí větší produktivitu zvlákňování, tudíž výsledná příze bude obsahovat více nanovláken, než při zvlákňování s elektrodou kuželovou, a to při srovnatelné jemnosti výsledných nanovláken. V grafu 6.10 je znázorněno porovnání výsledných produktivit. Z výsledků vyplývá, že nárůst produktivity je dvojnásobný. Není tedy trojnásobný, jak bylo teoreticky uvažováno. Jedno z možných vysvětlení je, že současné pumpy, které stroj využívá pro dodávku polymeru, nedokážou zajistit větší průtok soustavou a třetí stupeň Stromečkové elektrody není plnohodnotně přeplavován. Toto bylo během testů pozorováno. Stroj, na kterém bylo testování provedeno, využívá pro dodávání polymeru peristaltickou pumpu, která funguje na principu cyklického stlačování hadičky uvnitř pumpy. V důsledku velké viskozity roztoku zvlákňovaného polymeru nedocházelo k úměrnému zvýšení průtoku v závislosti na nastavení průtoku na pumpě. Proto by bylo vhodné pro dodávání polymeru použít pumpy s větším výkonem, nebo pumpy fungující na jiném principu.

Dále je třeba brát v úvahu, že zvlákňování na Kuželové elektrodě probíhalo při napětí 25 kV, což je o 31 % vyšší než napětí optimální, dle měření v kap. 6.3.1. Zvlákňování tedy probíhalo i z trubičky elektrody a část nanovláken vznikala právě v tomto místě, což bylo pozorováno. V důsledku toho docházelo k parazitnímu zvyšování produktivity a také k produkci nanovláken o jiné jemnosti než na hlavě elektrody. Na Stromečkové elektrodě zvlákňování probíhalo při napětí 30 kV, což je jen o 7 % vyšší než optimální. Nanovlákná na trubičce Stromečkové elektrody se prakticky netvořila.

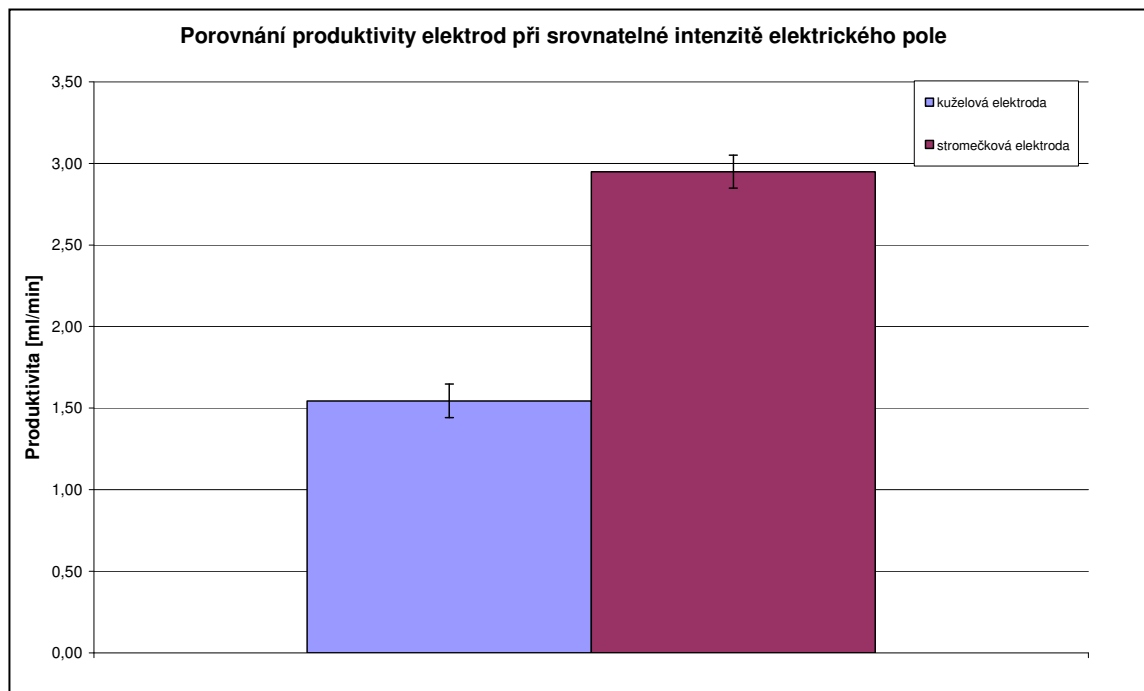
6. Analýza a optimalizace zvláknovací elektrody

Z toho lze usoudit, že zvýšení produktivity u Stromečkové elektrody může být skutečně vyšší, než bylo měřením zjištěno.

tab. 6.12 Hodnoty naměřené při zvláknování

	Kuželová		Stromečková	
Napětí [kV]	25		30	
Teoretická intenzita [V/mm]	viz obr. 6.11 a 6.12 str. 53			
Doba měření [min] [s]	19	26	19	40
Doba měření [s]	1166		1180	
Doba měření [min]	19,43		19,67	
Objem v dodávacím válci před měřením [ml]	220,00		242,00	
Objem v dodávacím po měření [ml]	22,00		40,00	
Objem dodaný [ml]	198,00		202,00	
Průtok [ml/min]	10,19		10,27	
Objem v přepadovém válci před měřením [ml]	30,00		42,00	
Objem v přepadovém válci po měření [ml]	198,00		186,00	
Objem přeplavený [ml]	168,00		144,00	
Objem zvlákněný [ml]	30,00		58,00	
Produktivita elektrody [ml/min]	1,54		2,95	
Nárůst produktivity	1,91			
Chyba objem dodaný [ml]	± 1,41		± 1,41	
Chyba objem zbylý [ml]	± 1,41		± 1,41	
Chyba objem zvlákněný [ml]	± 1,99		± 1,99	
Chyba čas [min]	± 0,005			
Chyba produktivita [ml/min]	± 0,10		± 0,10	
Chyba produktivita [%]	± 6,6		± 3,4	

Pozn.: Chyby měření byly vypočteny na základě teorie chyb dle literatury [13] Nejmenší dílek na stupnici odměrného válce nabýval hodnoty 2 ml a nejmenší odečítaná hodnota času byla jedna sekunda.



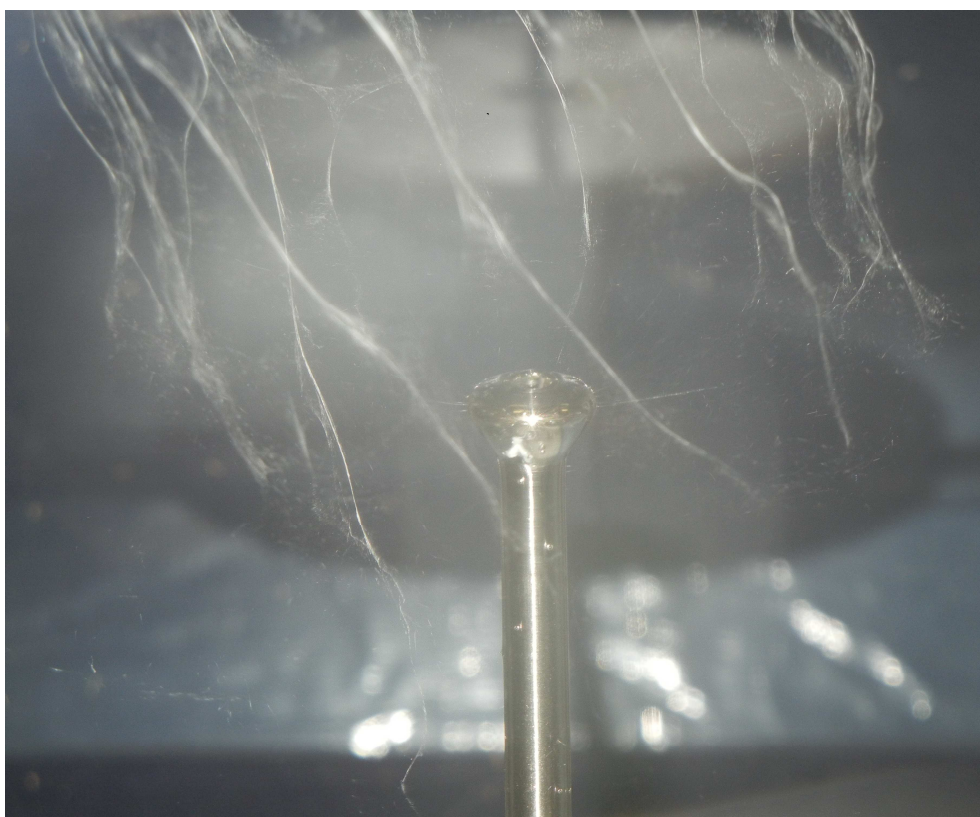
graf 6.10 porovnání produktivit

6. Analýza a optimalizace zvlákňovací elektrody

Na obrázku 6.14 je fotografie pořízena při zvlákňování na Stromečkové elektrodě. Z obrázku je patrné, že dochází ke zvlákňování ze všech tří stupňů elektrody. Na obr. 6.15 je pro porovnání fotografie ze zvlákňování na elektrodě kuželové.



*obr.6.14 Záznam zvlákňování na stromečkové elektrodě, napětí 30kV,
produktivita $2,95 \pm 0,1$ ml/min*



*obr 6.15 Záznam zvlákňování na stromečkové elektrodě, napětí 25kV,
produktivita $1,54 \pm 0,1$ ml/min*

6. Analýza a optimalizace zvlákňovací elektrody

Zvýšení produktivity je možné pozorovat i při pohledu na výslednou vyrobenou nanopřízi. Na obrázku 6.16 je fotografie dvou návinů jádrové nanopříze. Nahoře je znázorněn návin příze s nanovláknny vytvořenými pomocí Kuželové elektrody, na kterém je patrná prosvítající tmavá příze, která tvoří jádro. Spodní cívka obsahuje přízi s nanovláknny, vzniklými pomocí nové Stromečkové elektrody. Zde k prosvítání jádra příze prakticky nedochází. Je tedy patrné, že díky nové elektrodě je možné vyrábět přízi s větším zaplněním nanovláken.

Mimo možnosti vyrábět přízi s větším zaplněním je také možné při stávajícím zaplnění téměř zdvojnásobit rychlost výroby nanopříze, což znamená značný přínos pro přechod na budoucí průmyslovou výrobu jádrové nanopříze.



obr 6.15 Porovnání návinů jádrové příze s nanovláknny vzniklými na rozdílných elektrodách

7 Závěr

Úkolem diplomové práce byl návrh nového řešení některých konstrukčních uzlů laboratorního stroje, který slouží pro výrobu jádrové nanovláknenné příze.

První část práce se zabývala návrhem a konstrukcí nového navíjecího ústrojí pro tvorbu cívek s nanopřízí o velikostech laboratorních vzorků. V konstrukci navíjecího ústrojí bylo využito principu řemínkového rozvádění. Bylo navrženo několik typů vodičů rozváděné příze, z nichž jeden byl využit ve výsledné konstrukci navíjecího ústrojí. Pro navržené konstrukční řešení byla vyhotovena výkresová dokumentace. Navíjecí ústrojí bylo na základě výkresové dokumentace vyrobeno a na stroji testováno. Bylo prokázáno, že navržený systém je plně funkční a je šetrný k nanovláknenné vrstvě na jádrové přízi.

Druhá část práce byla zaměřena na analýzu stávající zvlákňovací elektrody a návrh nového tvaru, který byl následně podroben analýze a optimalizován z hlediska rozložení intenzity elektrického pole. Byla navržena takzvaná „Stromečková elektroda“, která má oproti stávající elektrodě více zvlákňovacích stupňů a umožňuje zvýšit produktivitu zvlákňování polymeru při stejné jemnosti vyrobených nanovláken.

V závěru práce byla provedena měření přímo při procesu zvlákňování, která potvrdila zvýšení produktivity výroby nanovláken. Produktivita na nově navržené Stromečkové elektrodě byla naměřena dvakrát vyšší, než na elektrodě stávající. Zvýšení produktivity bylo omezeno nedostatečným dávkováním roztoku polymeru do zvlákňovací elektrody v důsledku použití pumpy s malým výkonem. Při použití pumpy s dostatečným výkonem lze předpokládat dosažení většího nárůstu produktivity zvlákňování.

Lze konstatovat, že Stromečková elektroda má značný přínos do procesu výroby nanovláknenné jádrové příze. Přináší možnost výrazného zvýšení objemu nanovláken v přízi, nebo možnost zvýšení výrobní rychlosti při zachování stejného zaplnění příze nanovláknem při 20% zvýšení hodnoty potřebného elektrického napětí.

Použité zdroje

- [1] Kaniok, J.: *Nový systém dokonalého přesného křížového vinutí* (Disertační práce), Liberec, 2004
- [2] Žabka, P. *Mechatronicky system rozvadění přize* (Disertační práce), Liberec, 2013
- [3] Amrich, M. *Navíjecí zařízení pro skupinové navíjení* (Diplomová práce), Liberec 2013
- [4] Mihálik, M. *Analýza a optimalizace zvlákňovací hlavy* (Bakalářská práce), Liberec 2013
- [5] Feynman, R. *There's Plenty of Room at the Bottom*. (Přednáška), Caltech 1959
[online] URL: <http://www.pa.msu.edu/~yang/RFeynman_plentySpace.pdf>,
[cit. 6.4.2015]
- [6] Hübner, K. *Konstrukce a optimalizace zařízení na výrobu nanovláken* (Bakalářská práce), Liberec 2012
- [7] FibeRio Technologi Corporation *webové stránky společnosti FibeRio* [online]
URL: <<http://fiberiotech.com/technology/how-it-works/>>, [cit. 8.4.2015]
- [8] Způsob výroby polymerních nanovláken zvlákňováním roztoku nebo taveniny polymeru v elektrickém poli a lineární útvar z polymerních nanovláken vytvořený tímto způsobem. *Patentový spis CZ 304173 B6* [online] URL:<<http://upv.cz>>,
[cit. 8.4.2015]
- [9] Preparation of Cellulose-based Nanofibers Using Electrospinning *Odborný článek*
[online] URL: <<http://www.intechopen.com/books/nanofibers/preparation-of-cellulose-based-nanofibers-using-electrospinning>>, [cit. 17.5.2015]
- [10] Elmarco s.r.o. *webové stránky společnosti Elmarco s.r.o.* [online] URL:
<www.elmarco.cz>, [cit. 18.4.2015]
- [11] High throughput of quality nanofibers via one stepped pyramid-shaped spinneret. *Odborný článek* [online] URL: <www.elsevier.com/locate/matlet>,
[cit. 8.4.2015]
- [12] Stepper motors Masmot *Manuál k motoru Masmot 80MPF 3,25* [online] URL:
<<http://www.mikroteh.zp.ua/MASMOT-ENG.pdf>>, [cit. 20.4.2015]
- [13] Chyby měření, *skripta ZČU* [online] URL:<http://www.kfy.zcu.cz/dokumenty/FP1/chyby_mereni.pdf>,[cit. 17.5.2015]

Seznam příloh

CD ROM

Výkresová dokumentace